



Rutura da Barragem da Caniçada
Simulação de Cenários de inundação no vale a jusante

UMinho 2016 Carla Sofia Pimenta Barbosa



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Carla Sofia Pimenta Barbosa

Rutura da Barragem da Caniçada
Simulação de Cenários de inundação no vale a jusante

Dezembro 2016



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Carla Sofia Pimenta Barbosa

Rutura da Barragem da Caniçada
Simulação de Cenários de inundação no vale a jusante

Dissertação de Mestrado
Engenharia Urbana - Hidráulica Ambiental

Trabalho efetuado sob a orientação da:
Professora Doutora Maria Manuela Lemos Lima

Trabalho efetuado sob a coorientação do:
Professor Doutor José Luis Pinho

Dezembro 2016



AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostava de agradecer à minha orientadora Prof. Dr. Maria Manuela Lima o facto de me ter permitido a escolha deste tema, e pelas sugestões ao longo deste trabalho. Não podia deixar de agradecer também ao meu coorientador Prof. Dr. José Luís Pinho, por todo o apoio, e todos os minutos que despendeu da sua hora de almoço e do seu descanso para me ajudar.

Agradeço aos seguintes municípios a cedência de informação indispensável à elaboração deste estudo.

Agradeço aos seguintes Municípios a cedência de informação indispensável à elaboração deste estudo:

- Câmara -Municipal de Amares, na pessoa do Dr. Isidro Araújo (Vice-Presidente) e Dr.^a Maria da Luz Fernandes (Urbanismo)
- Câmara Municipal de Vila Verde, na pessoa do Dr. Manuel Lopes (Vice-Presidente) e Eng. José Bezerra (Vereador)
- Câmara Municipal de Barcelos, na pessoa do Dr. Alexandre Maciel, vereador do urbanismo.
- Câmara Municipal de Esposende na pessoa do Dr. Maranhão Peixoto, vice-presidente
- Comunidade Intermunicipal do Cávado (CIM Cávado) na pessoa da Eng. Goreti Meira

Agradeço igualmente ao meu colega e amigo Pedro Costa, geografo e topógrafo, pela ajuda na cartografia, pelas dicas certas no momento certo, obrigada pela paciência; ao Hugo Xavier da Mota-Engil a cedência de informação relevante, e à minha amiga Ana Corvo Nunes.

Agradeço a todos os meus colegas do mestrado de Engenharia Urbana, em especial aos colegas de Hidráulica Ambiental; Mariana Carvalho, José Pedro Peixoto e Renato Lopes por todos os momentos que passámos juntos.

Não posso deixar de agradecer aos meus Pais e ao meu Marido, por todo o apoio, pois foram sempre os pilares da minha vida.





RESUMO

O colapso súbito e inesperado de uma barragem traduz-se na formação de uma onda de cheia induzida, que aumentando o caudal normal do rio origina o trasbordo do leito normal, provocando uma inundação nos terrenos adjacentes. As cheias induzidas são frequentemente mais perigosas que as cheias naturais por duas grandes razões, por um lado ocorrem numa situação em que as populações têm uma falsa percepção de segurança, e por outro lado a subida dos níveis da água é mais rápida do que a subida associada a uma cheia natural, o que diminui o tempo disponível para avisar e evacuar as populações.

A dissertação aqui apresentada tem como principais objetivos analisar os impactos que um possível colapso na barragem da Caniçada poderia provocar no seu vale a jusante. De forma a avaliar convenientemente os danos causados no vale a jusante da barragem, é necessário determinar as zonas inundáveis pela cheia provocada pela rotura da barragem, afetando a população, infraestruturas, instalações e ambiente

A simulação do processo de propagação da cheia induzida é obtida a partir das equações da hidrodinâmica, correspondentes a escoamentos de superfície livre. O modelo computacional foi efetuado recorrendo ao software SOBEK. Com este modelo foi possível determinar os valores máximos dos caudais de ponta de cheia, as velocidades máximas de escoamento, os níveis máximos de escoamento e os tempos de propagação do pico da frente de onda, com os respetivos instantes de chegada a cada uma das secções do vale a jusante. Com a informação dos níveis máximos atingidos pelo escoamento foi possível delinear as áreas a jusante onde ocorrem inundações e definir o respetivo mapa de inundações.

A análise dos mapas de inundação permitiu identificar que o maior número de habitantes em risco se encontram no concelho de Vila Verde, na Vila de Prado, e no concelho de Esposende, mais propriamente na Vila de Fão, sendo que a maior perda de indústrias acontece na zona industrial de Padim da Graça (concelho de Braga), enquanto a maior perda de equipamentos públicos acontece em Barcelos.

Palavras-Chave: Colapso de Barragem; Cheia Induzida; percepção de risco; segurança de barragens; gestão de risco; planos de emergência; hidrograma de rutura; SOBEK





ABSTRACT

A dam's sudden and unexpected collapse results in a flood induced wave, which increases the river's usual flood, and leads to the overflow of its standard boundaries, originating the inundation of the adjacent fields. The induced floods are frequently more dangerous than the natural ones for two reasons, on the one hand they occur in a situation in which the population has a false perception of security, and on the other hand the rise of the water levels is much faster than that associated with natural floods, which decreases the time available to warn and evacuate the population.

This dissertation's main objectives are to analyze the impacts that the possible collapse of the Caniçada dam could have on its downstream valley. In order to properly analyze the damages on the dam's downstream valley it is necessary to determine the areas most likely to be flooded by the dam's rupture, affecting its people, infrastructures, installations and environment.

The simulation of the induced flood's process of propagation is obtained from the hydrodynamic equations, used in case of free surface flows. The computational model was created in SOBEK software. With this model, it was possible to determine the highest values of the full water flows, maximum drainage velocities, highest drainage levels and dispersal time of the wave's peak front, and its respective arrival moment to each section of the downstream valley. With the information about the top values achieved by the water's drainage, it was possible to delineate the surrounding areas where floods occur and create a map of inundations.

The inundation's maps analysis, made is possible to conclude that the regions with the highest threatened number of inhabitants were Vila Verde - Vila de Prado and Esposende, more precisely in Vila de Fão. The biggest loss in industries happens in Padim da Graça's industrial sector (Braga), and the highest loss of public equipment is felt in Barcelos.

Key-words: Dam Collapse; Induced Flood; risk perception; dam safety; risk management; emergency plans; rupture's hydrograph; SOBEK.



ÍNDICE GERAL

CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO	x
1.1– Motivações	1
1.2 - Objetivos	1
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
CAPITULO 2 - Estado de Arte	5
2.1 Histórico de Colapso de Barragens	6
CAPITULO 3 – AS BARRAGENS E A GESTÃO DE RISCO	13
3.1 Funcionamento das barragens	13
3.1.1 Tipos de uma barragem	13
3.1.2 Descarregadores de cheias	14
3.1.3 Descarregadores de Fundo	16
3.1.4 Tomada de Água	16
3.1.5 Conduta de carga	17
3.1.6 Chaminé de equilíbrio	17
3.1.7 Circuito Hidráulico	18
3.1.8 Dissipadores de Energia	18
3.1.9 Central Hidroelétrica	19
3.1.10 Turbinas	20
3.1.11 Alternadores	21
3.2 Conceito do Risco	22
3.3 - Risco associado À segurança de barragens	22
3.3.1 Risco para os vales a jusante	23
3.3.2 Perceção do risco	24
3.4 Risco de Rutura de Barragens em Portugal	24
3.5 Avaliação do Risco	26
3.5.1 Avaliação do Risco para o vale a jusante	29
3.5.2 Risco Socialmente aceitável	31
3.5.3 Simulação da Cheia induzida	31
3.5.4 Propagação da cheia induzida	32
3.5.5 Caracterização do vale a jusante	33
3.6 Mitigação do Risco	34
3.7 Legislação nacional	35
3.8 Controlo de segurança nas barragens	41
3.8.1 Histórico de controlo de segurança nas barragens	43
3.8.2 Sistemas emergentes de controlo de segurança nas barragens	47
CAPITULO 4 – DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	49
4.1 Enquadramento geral	49
4.2 Geomorfologia	50
4.3 Hidrologia	51
4.4.1 Precipitação	54
4.5 Ocupação do solo	55
4.6 Caracterização Socioeconómica	56
4.6.1 Demografia	56



4.6.2 Idade da população	57
4.6.3 Escolaridade da população	61
4.6.4 Acessibilidades	61
4.6.5 Património relevante	62
4.6.5.1 Fauna e flora.....	62
4.6.5.2 Paisagem.....	62
4.7 Delimitação da área de estudo	62
CAPITULO 5 – DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA.....	65
5.1 Formulação matemática do modelo utilizado.....	65
5.1.1 Aproximação ao escoamento unidimensional.....	65
5.2 Software de modelação hidrodinâmica e hidrológica.....	66
5.3 Hidrograma de rutura.....	67
5.4 Construção do Modelo.....	69
5.5 Cenários propostos	73
CAPITULO 6 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	75
6.1 Hidrogramas de rutura	75
6.2 Resultados obtidos – Cenário 1	79
6.2.1 Chegada da Onda de Inundação – Cenário 1	79
6.2.2 Tempo para a máxima inundação – Cenário 1	80
6.2.3 Caudal máximo da onda de inundação – Cenário 1	81
6.2.4 Velocidade máxima da onda de inundação – Cenário 1	82
6.2.5 Cota máxima da onda de inundação – Cenário 1	83
6.2.6 Mapas de inundação – Cenário 1	84
6.2.7 Risco para o vale a jusante da Barragem da Caniçada – Cenário 1	93
6.3 Resultados Obtidos – Cenário 2	94
6.3.1 Chegada da onda de inundação – Cenário 2	94
6.3.2 Tempo para a máxima inundação – Cenário 2.....	95
6.3.3 Caudal máximo da onda inundação – Cenário 2.....	96
6.3.4 Velocidade máxima da onda inundação – Cenário 2	97
6.3.5 Cota máxima da onda inundação – Cenário 2.....	98
6.3.6 Mapas de inundação – Cenário 2	98
6.3.7 Risco para o vale a jusante da Barragem da Caniçada – Cenário 2	106
6.4 Resultados Obtidos – Cenário 3	107
6.4.1 Mapas de inundação – Cenário 3.....	108
6.4.2 Risco para o vale a jusante da Barragem da Caniçada – Cenário 3.....	114
CAPITULO 7 CONCLUSÃO.....	115
7.1 Considerações finais	116
7.2 Trabalhos futuros	117
8 Referências	118



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - idade das barragens portuguesas, ano de referencia 2011	6
figura 2 - cidade de johnstown antes e depois do acidente	9
figura 3 - barragem de malpasset, antes e depois do acidente	10
figura 4 - riviera francesa após o acidente	10
figura 5 - barragem na atualidade figura 6 - vila longarone após o desastre	11
figura 7 - longarone, antes e depois do desastre	11
figura 8 - rutura da barragem teton	12
figura 9 - barragem do alto cávado	14
figura 10 -barragem da caniçada	15
figura 11 - descarregador em poço - barragem de paradela	15
figura 12 - descarregadores de emergência da barragem de venda nova	16
figura 13 -descarregador de fundo barragem alto rabagão	16
figura 14 - esquema de tomada de água da barragem do alto rabagão	17
figura 15 - esquema de circuito hidráulico do alto rabagão	17
figura 16 - chaminé de equilíbrio – canastra	18
figura 17 - exemplo circuito hidráulico	18
figura 18 - bacia de dissipação de energia da barragem de salamonde	19
figura 19 - central hidroelétrica de penide figura 20 - central de lindoso	19
figura 21 - turbina peltron figura 22 - turbina peltron	20
figura 23- turbina peltron com 2 injetores	20
figura 24 - turbina francis	21
figura 25 turbina kaplan	21
figura 26 - alternador de central hidroelétrica da caniçada	21
figura 27 - carta de perigosidade de rutura	25
figura 28 - risco hidrológico por concelho	25
figura 29 - localização de barragens a norte de portugal	25
figura 30- esquema geral de avaliação de risco num vale com barragem	27
figura 31 - critério rsa da ancold	31
figura 32 - variação da velocidade de propagação da frente de onda	32
figura 33 - propagação da cheia induzida no vale a jusante	33
figura 34 - gestão operacional do risco nas barragens e vales	34
figura 35 - filosofia geral de gestão de risco	35
figura 36 - quadro de classes de barragens	36
figura 37 - responsabilidade dos planos de emergência	36
figura 38 - sinalização de emergência figura 39 - aviso sonoro	37
figura 40 - exemplos de raio de alcance do aviso sonoro. Exemplo barragem do alqueva.	37
figura 41 - delimitação da zona de intervenção do pei	37
figura 42 - quadro dos níveis de alerta	39
figura 43 - mapa de inundações da barragens do monte da rocha	40
figura 44- organização entre pei, o pee e as fases de emergência	40
figura 45 - histórico da legislação de barragens em portugal	41
figura 46 - escala limnimetrica da caniçada	43
figura 47 - plano de observação da barragem do cabril, 1950	43
figura 48 - plano de observação da barragem do varosa, 1974	44
figura 49 - ensaios de fluência em laboratório, década de 70	44
figura 50 - célula de fluência in situ na barragem de vilarinho das furnas, 1973	45
figura 51 - medição da velocidade de propagação de ondas ultrassonoras	45
figura 52 - medição da condutibilidade elétrica da água figura 53 - medição de caudais e de pressões	45
figura 54 - sistemas automáticos de recolha e arquivo de dados	46
figura 55 - comportamento observado no 1º enchimento da barragem do alqueva	46
figura 56 - estação total leica	47
figura 57 - laser scan figura 58 - barragem do alto ceira	47
figura 59 - localização da bacia a nível nacional	49
figura 60 - localização da bacia a nível regional	50
figura 61 - concelhos abrangidos pela bacia hidrográfica do cávado	50
figura 62 - altitudes na bacia hidrográfica do cávado	51
figura 63 - rede hidrográfica da bacia hidrográfica do cávado	52
figura 64 - barragens na bacia hidrográfica do cávado	53
figura 65 - altitudes das barragens da bacia hidrográfica do cávado	53



figura 66 - escoamento médio anual na bacia hidrográfica do cávado.....	54
figura 67 - precipitação média anual na bacia hidrográfica do cávado	55
figura 68 - humidade do ar na bacia hidrográfica do cávado	55
figura 69 - uso do solo na bacia hidrográfica do cávado)	56
figura 70 - população residente bacia hidrográfica cávado.....	57
figura 71 - densidade populacional bacia hidrográfica cávado	57
figura 72 - crianças residentes por concelho	57
figura 73 - população jovem residente por concelho	58
figura 74 - população ativa residente por concelho.....	58
figura 75 - população idosa residente por concelho.....	59
figura 76 - população de idade avançada residente por concelho	59
figura 77 - índice de dependência de idosos	60
figura 78 - índice de dependência de jovens	60
figura 79 - taxa de analfabetismo bacia hidrográfica cávado).....	61
figura 80 - mapa viário da bacia hidrográfica do cávado	61
figura 81 - mapa ferroviário da bacia hidrográfica do cávado	62
figura 82 - geometria e notação para escoamento em canal aberto.....	65
figura 83 - metodologia de análise de rutura de barragem	67
figura 84 -esquema conceptual do modelo.....	70
figura 85 - secção referente à confluência rio homem-rio cávado do modelo existente	71
figura 86 - secção referente à confluência rio homem-rio cávado após alteração de secção	71
figura 87 - definição simplificada das secções transversais	72
figura 88 – cenário 1 – largura da brecha de 162m.....	74
figura 89 - cenário 2 - largura da brecha de 62m	74
figura 90 - comparação entre hidrograma de rutura - cenário 1	76
figura 91 - comparação entre hidrogramas de rutura - cenário 2	76
figura 92 - hidrograma cenário 3 - funcionamento da caniçada em condições extremas.....	77
figura 93 - comparação entre hidrogramas cenário 1 e cenário 3.....	78
figura 94 - comparação entre hidrogramas cenário 2 e cenário 3.....	78
figura 95 - tempo para máxima cheia - molinário - cenário 1 (eixo xx tempo (h) – eixoyy caudal (m3)	82
figura 96 - relação entre cenário mais liberal, o cenário mais conservador e o cenário intermédio.....	85
figura 97 - perfil de inundação- zona ponte do porto - cenário 1	85
figura 98 - onda de inundação - zona ponte do porto - cenário 1	86
figura 99 - onda de inundação - ponte do bico - cenário 1	86
figura 100- perfil de inundação- zona ponte do bico - cenário 1	86
figura 101 – onda de inundação na vila de prado (vila verde) – cenário 1.....	88
figura 102 - perfil de inundação- vila de prado - cenário 1	88
figura 103 - onda de inundação - zona industrial padim da graça - cenário 1	89
figura 104 - perfil de inundação- vila de prado - cenário 1	89
figura 105 - onda de inundação - penide (barcelos) - cenário 1	90
figura 106 - perfil de inundação- penide - cenário 1	90
figura 107 - onda de inundação - ponte medieval (barcelos) - cenário 1	91
figura 108 - perfil de inundação- cidade de barcelos - cenário 1	91
figura 109 - onda de inundação em fão (esposende) - cenário 1	92
figura 110 - perfil de inundação- vila de fão - cenário 1	92
figura 111 - onda de inundação na cidade de esposende - cenário 2.....	93
figura 112- perfil de inundação- zona ponte do porto - cenário 2.....	99
figura 113 - onda de inundação - ponte do porto - cenário 2	100
figura 114 - onda de inundação - ponte do bico - cenário 2.....	100
figura 115- perfil de inundação- zona ponte do bico- cenário 2	100
figura 116-onda de inundação - vila de prado- cenário 2.....	101
figura 117 - perfil de inundação- vila de prado- cenário 2.....	101
figura 118- onda de inundação – padim da graça- cenário 2.....	102
figura 119 - perfil de inundação- vila de prado- cenário 2	102
figura 120 - onda de inundação - penide - cenário 2	103
figura 121 - perfil de inundação- penide- cenário 2	103
figura 122 - onda de inundação - barcelos - cenário 2	104
figura 123 - perfil de inundação- cidade de barcelos - cenário 2	104
figura 124 - onda de inundação - fão - cenário 2	105
figura 125 - perfil de inundação- cidade de barcelos - cenário 2	105
figura 126 - onda de inundação - esposende - cenário 2	106



figura 127 - onda de inundação - ponte do porte - cenário 3.....	108
figura 128- perfil de inundação- zona ponte do porto - cenário 3	108
figura 129 - onda de inundação - ponte do bico - cenário 3	109
figura 130 - perfil de inundação- zona ponte do porto - cenário 3	109
figura 131 - onda de inundação - vila de prado - cenário 3.....	110
figura 132 - perfil de inundação- vila de prado - cenário 3.....	110
figura 133 - onda de inundação - pandim da graça - cenário 3	111
figura 134 - perfil de inundação- vila de prado - cenário 3.....	111
figura 135 - onda de inundação - penide -cenário 3	112
figura 136 - perfil de inundação- vila de prado - cenário 3.....	112
figura 137 - onda de inundação - cidade de barcelos - cenário 3	112
figura 138 - perfil de inundação- cidade de barcelos - cenário 3	113
figura 139 - onda de inundação - vila de fão - cenário 3.....	113
figura 140 - onda de inundação - cidade de esposende - cenário 3	114

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – histórico de colapso de barragens.....	7
tabela 2 – características das turbinas	20
tabela 3 - escala de probabilidade de ocorrência.....	29
tabela 4 – escala de severidade das consequências	30
tabela 5 – matriz de classificação e priorização do risco	30
tabela 6 - grandezas a verificar para segurança de barragens.....	42
tabela 7 - características da barragem da caniçada.....	63
tabela 8 - características da albufeira da caniçada.....	63
tabela 9 - determinação da largura da brecha e tempo de rutura	68
tabela 10 - formulas testadas para o modelo hidrológico.....	69
tabela 11 - caraterísticas para o cenário1	73
tabela 12 - características para o cenário 2.....	74
tabela 13 - características para cenário 3	74
tabela 14 - caudais máximos associados aos diferentes tipos de rutura considerados	75
tabela 15 - chegada da onda de inundação - cenário 1	79
tabela 16 - tempo para a máxima inundação - cenário 1	80
tabela 17 - caudal máximo da onda de inundação.....	81
tabela 18 - velocidade máxima atingida pela onda de inundação - cenário 1	82
tabela 19 - cota máxima da onda de inundação – cenário 1	83
tabela 20 - chegada da onda de inundação - cenário 2.....	94
tabela 21 - tempo para máxima inundação - cenário 2.....	95
tabela 22 -caudal máxima da onda de inundação - cenário 2.....	96
tabela 23 - velocidade máxima da onda de inundação - cenário 2.....	97
tabela 24 - cota máxima inundação - cenário 2.....	98
tabela 25 - resultados obtidos cenário 3	107



CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO

As barragens são, desde o primórdio da civilização, essenciais ao progresso da espécie humana. A sua construção procurava essencialmente mitigar a escassez de água em períodos de seca, de forma mais ou menos intuitiva. Com a Revolução Industrial, surge a necessidade de construir um crescente número de barragens, o que permitiu o crescente aperfeiçoamento das técnicas de projeto e construção. Apareceram, então, as primeiras barragens de aterro modernas, assim como as barragens de betão.

A existência de uma barragem num vale constitui um fator de risco devido à eventualidade de rutura, que se manifesta na libertação do volume de água por esta abrangido, provocando cheias a jusante desta, e que constituem eventos catastróficos que podem conduzir a perdas consideráveis de vidas humanas e de bens materiais. Mesmo considerando que a probabilidade de rutura é relativamente baixa (10^{-6}) (aproximadamente igual à de um acidente de avião) (Almeida, 2011), o pressuposto de uma cheia resultante de um acidente numa barragem com consequências catastróficas, faz com que os organismos responsáveis pela segurança e proteção civil e a comunidade técnico-científica se debrucem sobre o problema relacionado com este tipo de acidente, no sentido de estudar e planear soluções de prevenção e atenuação dos seus efeitos.

A rutura de uma barragem induz a jusante uma onda de inundação que pode afetar muitas vidas humanas e causar elevados danos materiais. Inundações derivadas de ruturas de barragens constituem um risco geral para as pessoas e bens materiais, em parte devido à celeridade e imprevisibilidade da rutura da barragem.

1.1– MOTIVAÇÕES

A escolha do tema relacionado com a rutura de barragens resultou da imponência inerente a este tipo de estrutura, pela sua funcionalidade, e sobretudo pela necessidade de quantificar o risco que possam provocar nos vales a jusante. A escolha da bacia hidrográfica do Cávado, surge principalmente, por se tratar da área de residência da autora, por ser uma bacia que acolhe uma das maiores barragens de Portugal, como é o caso da Barragem do Alto Rabagão (Pisões), e por acolher barragens com um alto risco para o seu vale a jusante segundo Instituto da Água (INAG) e com elevado interesse para o plano de emergência (Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC), e finalmente por se tratar de uma bacia com um vale densamente povoado.

1.2 - OBJETIVOS

A dissertação desenvolvida tem como principais objetivos analisar os impactos que um possível colapso na barragem da Caniçada poderia provocar no seu vale a jusante. Dada a



atualidade do tema, constitui um objetivo da presente dissertação efetuar uma pesquisa bibliográfica detalhada sobre o risco para os vales a jusante de barragens, monitorização de barragens, o funcionamento das albufeiras e legislação existente em Portugal.

O objetivo principal é elaborar um estudo sobre o risco para o vale a jusante desta barragem, que possibilite a elaboração de mapas de risco na região em análise. Para alcançar este objetivo torna-se essencial a realização dos seguintes objetivos específicos:

- efetuar trabalho de campo para a obtenção dos dados referentes à barragem, à albufeira e ao vale a jusante, nomeadamente caracterização geral do clima, povoações existentes; tipo de ocupação social (rural, industrial, etc.); infraestruturas significativas (ex: rodoviárias, ferroviárias, etc.); áreas naturais com estatuto de proteção; património com interesse histórico.

- equacionar e propor um cenário de rotura / colapso da barragem, simulando uma cheia induzida, através do software SOBEK, que permitirá caracterizar o evento perigoso, sendo possível obter valores para o instante de chegada da frente da onda; nível máximo de cheio atingido (altura e cota); duração da cheia; velocidade máxima da onda de inundação; caudal máximo; identificando desta forma zonas de risco, e caracterizando as zonas mais destrutivas.

Assim, a elaboração desta dissertação poderá ser de extrema importância, quer para a população residente no vale em estudo, quer para os organismos públicos responsáveis por esta temática nesta região, dando desta forma um contributo para a melhoria da legislação já implementada, e chamando a atenção para esta problemática, especificamente nesta zona.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

- Capítulo 1 – Introdução – refere-se a generalidades, motivação, objetivos, e estrutura do documento.
- Capítulo 2 – Estado de Arte – são descritos alguns estudos efetuados sobre a temática, assim como um breve estudo sobre a idade do parque nacional de Barragens, e um historial de colapso de barragens ao longo dos anos.
- Capítulo 3 – Gestão do Risco em Barragens – são abordados temas como o risco associado à segurança de barragens, assim como o risco para os vales a jusante, nomeadamente a perceção do risco, a gestão do risco, e a avaliação do mesmo, incluindo ainda o conceito de risco socialmente aceitável. É abordado o processo de simulação e propagação da cheia induzida, a importância e modo como deve ser caracterizado o vale a jusante da barragem. É ainda abordado o controlo de segurança nas barragens, de que modo se pode controlar e monitorizar o comportamento estrutural das barragens, e as novas tecnologias emergentes. É igualmente apresentado um historial sobre o controle de segurança de barragens em Portugal desde a



década de 50 até aos dias de hoje. É abordado o funcionamento hidrológico das albufeiras em geral, no que se refere aos vários órgãos, tais como tipos de barragens, descarregadores e turbinas, entre outros. É analisada a legislação nacional sobre a temática, nomeadamente, o regulamento de Segurança de Barragens (RSB), planos de emergência internos e externos.

- Capítulo 4 – Descrição do Caso de Estudo – Neste capítulo é descrita a escolha da barragem e do vale em estudo. São apresentadas as características da albufeira (quanto à área, declives da encosta, armazenamento de água, caracterização geral do clima), da barragem (quanto à sua estrutura e do vale nomeadamente povoações existentes; tipo de ocupação social (rural, industrial, etc.)), infraestruturas significativas (ex: rodoviárias, ferroviárias, etc.), áreas naturais com estatuto de proteção e património com interesse histórico.
- Capítulo 5 – Descrição da metodologia Trata-se da apresentação da metodologia a aplicar ao caso de estudo, sendo apresentados os métodos, e fórmulas utilizadas para os cálculos, e apresenta-se o software utilizado.
- Capítulo 6 – Análise e discussão dos Resultados – São apresentados os resultados obtidos através dos métodos apresentados no capítulo anterior, assim como uma discussão dos mesmos.
- Capítulo 7 – Conclusão – refere-se às conclusões obtidas após a finalização do caso prático e apresentação de propostas para trabalhos futuros.





CAPITULO 2 - ESTADO DE ARTE

O projeto dos primeiros empreendimentos hidroelétricos em Portugal iniciou-se no século XX, com o início da exploração em meados desse século de Barragens como a de Castelo do Bode em 1951. Associado à construção de dezenas de barragens surge a preocupação com a sua segurança, sendo a experiência portuguesa em estudos desta natureza significativa. Salientam-se os estudos pioneiros na década de 80, anteriores ao Regulamento de Segurança de Barragens RSB) das cheias induzidas pela rutura das seguintes barragens:

- barragem de Castelo do Bode, Rio Zêzere (Almeida e Henriques, 1982);
- barragem da Aguieira e Açude da Raiva, Rio Mondego, envolvendo simulação bidimensional (Almeida e Rodrigues, 1984 e 1986);
- onze barragens no Rio Douro (Almeida e Ornelas, 1987);
- barragem da Meimoa, Ribeira da Meimoa (Coba, 1987);
- barragens do Funcho e Silves, Ribeira do Arade (Coba, 1986);
- barragem do Torrão, Rio Tâmega (Nogueira e Ribeiro, 1987).

Nos dias de hoje, e já com alguma legislação aplicável à questão das barragens, são inúmeros os estudos efetuados sobre colapso / ruturas de barragens e as consequências para os vales a jusante, a nível mundial.

No contexto do colapso de barragens é fundamental perceber a que nível se encontra o parque de barragens Portuguesas, no que se refere a idade. Pela análise da figura 1, podemos observar que na sua maioria as barragens Portuguesas têm idade inferior a 25 anos (25%). No entanto um número bastante significativo (21%) de barragens apresentava já em 2011 mais de 50 anos, sendo ainda que 9% das barragens Portuguesas tinham já mais de 70 anos, e estando desta forma praticamente no fim da sua vida útil, atendendo a que, segundo o Eurocódigo 1, estruturas como barragens são planeadas para uma vida útil de 100 anos.

Idade das Barragens Portuguesas

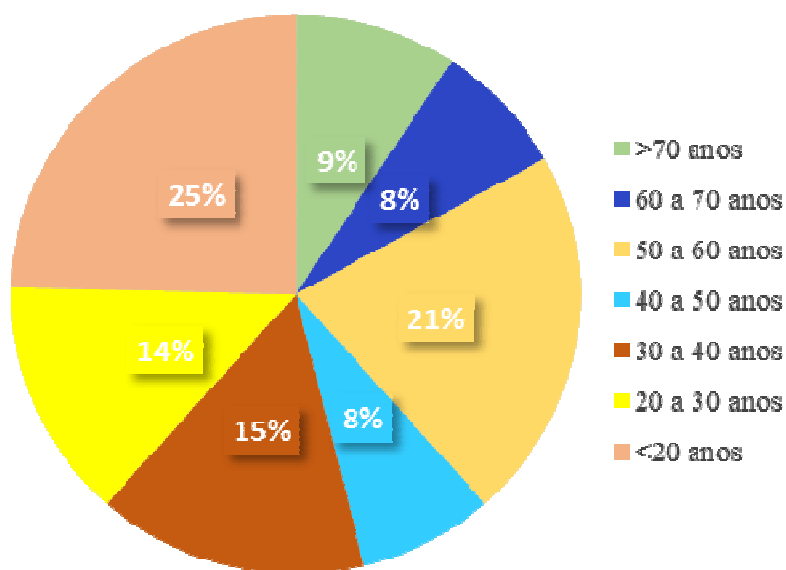


Figura 1 - Idade das Barragens Portuguesas, ano de referencia 2011 (adaptado de Camelo, 2011)

2.1 HISTÓRICO DE COLAPSO DE BARRAGENS

O colapso de barragens pode ter na sua origem várias causas, sendo que a experiência retirada de alguns acidentes históricos e catástrofes que tiveram lugar nos últimos séculos, mostram-nos que o evento adverso mais preocupante para os vales a jusante de barragens são o galgamento e a inoperacionalidade das estruturas hidráulicas das barragens (tabela 1), tais como a insuficiência dos descarregadores de cheias e designados, neste trabalho, de fatores hidráulicos operacionais.



Barragem	País	Ano de Desastre	Altura da Barragem	Causas	Tempo de Aviso (min)	Número de pessoas em risco	Vidas Perdidas
Abefan (rejeito)	Reino Unido	1966					144
Austin	EUA	1911	15				80
Babii Yar	URSS	1963		Fatores hidráulicos operacionais			145
Baldwin Hills	EUA	1963	20,1	Erosão interna do maciço em condições normais do clima	78	16500	5
Banqiao, Shimantan e 60 outras	china	1975	24 (Banqiao)	Galgamento			230000
Bear Wallow	EUA	1976	15	Fatores hidráulicos operacionais	0	8	4
Belci	Romênia	1991	18	Galgamento			78
Bergeron Pond	EUA	1996	11	Rutura ocorreu na região do vertedouro, a barragem não foi galgada	0	50	1
Big Thompson	EUA	1976			< 60	2500	139
Bilá Desná	Checoslováquia	1916	17	Fatores hidráulicos operacionais			65
Black Hills	EUA	1972			< 60	17000	245
Bolan	Paquistão	1976	19	Fatores hidráulicos operacionais			20
Bouzey	França	1895	18				100
Buffalo Creek	EUA	1972	14	Escorregamento do talude da barragem durante um evento chuvoso	0	4000	125
Bushy Hill Pond	EUA	1982			120-180	400	0
Camará	Brasil	2004	50	Problemas na rocha de fundação da ombreira esquerda		>3000	6
East Lee	EUA	1968	8				2
Eigiau e Coedty	Reino Unido	1968	8				2
El Cobre (rejeito)	Chile	1965					200
Evans e Lockwood (Cascata)	EUA	1989	5,5/4,3	Ambas romperam por galgamento	0 elevado		2
Fergoug ou El Habra	Argélia	1881	43	Fatores hidráulicos operacionais			209
Frias (Pardo)	Argentina	1970	15	Galgamento			102
Gleno	Itália	1923	70	Escorregamento do talude jusante			600
Gotwan	Irã	1980	22	Fatores hidráulicos operacionais			200
Gouhou	China	1993	70	Escorregamento do talude jusante			1257
Granadillar	Espanha	1959	34				9
Hirakud	Índia	1980	61				118
Hyokiri	Correia do Sul	1961	16	Galgamento			139
Iruka	Japão	1868	28	Fatores hidráulicos operacionais			1200
Kansar City	EUA	1977			<60	1000	25
Kansas River	EUA	1951				58000	11
Kantalai	Sri Lanka	1986	27	Erosão interna do maciço			127
Kamataka	Índia	1981	2	Fatores hidráulicos operacionais			47
Kelly Barnes	EUA	1977	12,2	Rutura por erosão interna pelo maciço associada a escorregamento durante uma cheia de 10 anos de período de retorno	<30	250	39
Kendal Lake	EUA	1990		Galgamento	0 elevado		4
Kénogami	Canadá	1996					5
Kuala Lumpur	Malásia	1961					600
La Paz	México	1976	10				430
Laurel Run	EUA	1977	12,8	Galgamento	0	150	40
Law Lake	EUA	1968	7,9	erosão interna durante clima normal	0	5000	3
Lee Lake	EUA	1968	7,6	erosão interna	0	80	2
Little Deer Creek	EUA	1963	26,2	erosão interna durante clima normal	<60	50	1
Lower Otay	EUA	1916	40	Galgamento			30

Tabela 1 – Histórico de Colapso de Barragens (adaptado de Marques, 2014)



Barragem	Pais	Ano de Desastre	Altura da Barragem	Causas	Tempo de Aviso (min)	Número de pessoas em risco	Vidas Perdidas
Machu II	India	1979	26	Galgamento			1800
Malpasset	França	1959	60	Colapso devido a um movimento de rocha da ombreira esquerda	0	6000	433
Mil River	EUA	1899		Rutura durante uma redução de extravazão causada por fissuras resultantes da pressão na barragem			143
Mochikochi	Japão	1978					200
Mohegan Park	EUA	1963	6,1	Erosão interna durante nível elevado causado pela chuva	0	6	1
Nanaksagar	India	1967	16	Erosão interna pela fundação			100
Nix Lake	EUA	1989	7	Galgamento	0	6	1
Northern New Jersey	EUA	1984			>120	25000	2
Orós	Brasil	1960	54	Fatores hidráulicos operacionais			1000
Panshet / Khadakwasia	India	1961	54/42	Erasão interna pelo maciço / Galgamento			1000
Prospect Dam	EUA	1802	21,9	Falha da Fundação			608
Quebrada la Chapa	Colombia	1963					250
Santo Thomas	Filipinas	1976	33	Fatores hidráulicos operacionais durante a construção			80
Sargozan	URSS	1987					28
Sempor	Indonésia	1967	54	Fatores hidráulicos operacionais durante a construção			200
Shivaji i Sakar	India	1967	103				180
South Fork-Johnstown	EUA	1889	22	Galgamento			2209
St. Francis	EUA	1928	62	Falha de fundação			450
Stava	Itália	1985					150
Swift / Two Medicine	EUA	1964	47,9/11	Galgamento durante um evento extremo	<90	250	27
Teseno	Italia	1982					214
Teton	EUA	1976	123	Erosão interna pela fundação durante 1º enchimento	<90	2000	7
Texas Hill Country	EUA	1978			<90	1500	25
Tigra	India	1917	26	Fatores hidráulicos operacionais			1000
Timber Lake	EUA	1995	10,1	Galgamento	0	4	2
Tirlyan	Russia	1994	13				75
Torrejon Tajo	Espanha	1965	62	Rutura de comporta			30
Tous	Espanha	1982	50	Galgamento			40
Vajont	Itália	1963		Galgamento devido a um grande escorregamento de terra sobre o reservatório			2600
Valparaiso	Chile	1888	17				100
Vega de Terra	Espanha	1959	34		0	500	150
Virginia nº 15	áfrica do Sul	1994	47				39
Vratsa	Bulgária	1966					600
Walnut Grove	EUA	1890	33	Fatores hidráulicos operacionais			150
Zerbino	Itália	1935	12	Fatores hidráulicos operacionais			111
Zgorigrad	Bulgaria	1966	12	rutura de barragem a montante			96

Tabela 1 – Histórico de Colapso de Barragens (adaptado de Marques, 2014)

•BARRAGEM DE SOUTH FORK (EUA) (1889)

A construção da barragem de South Fork inicia-se a 1840, ficando concluída em 1853. Construída numa zona montanhosa do rio Mississipi (zona de denso agregado populacional), o seu principal objetivo foi a construção de uma linha de ferro (Pinto, 2008).

O Estado da Pensilvania (dono de obra) vende a barragem a um privado que coloca uma rede à entrada do descarregador, para evitar a fuga de peixes, promovendo desta forma o seu clube de Pesca e Caça da Região. O mesmo decide ainda baixar a cota do coroamento para permitir a circulação de veículos.

A cidade de Johnstown localizada a 20 km da barragem e a uma cota mais baixa em cerca de 450m, albergava uma população de 30 000 habitantes. Sendo que em 1880, 27 anos após a conclusão da barragem, os organismos estatais da cidade, mostram-se preocupados pela segurança da barragem. (Pinto, 2008).

Em 31 de maio de 1889 após uma elevada pluviosidade, a barragem apresenta-se em perigo iminente, decidindo-se a remoção do gradeamento do descarregador, a execução do alteamento do coroamento, e um novo descarregador. No entanto, nesse mesmo dia cerca das 11 horas, os responsáveis pela obra admitiram que o colapso da barragem era inevitável e iniciam-se ações de emergência, aviso e alerta, mas que não estavam a resultar. Cerca das 15 horas e 10 minutos a barragem ruiu, e cerca de 25 minutos depois a onda de cheia tinha já percorrido 20km atingindo a cidade de Johnstown (figura 2), tendo a duração de 1 hora (Pinto, 2008).

A comissão de inquérito chega á conclusão que a obra foi bem projetada e construída, no entanto houve deficiências graves na sua exploração (Pinto, 2008).



Figura 2 - Cidade de Johnstown antes e depois do acidente (Pinto, 2008)

• BARRAGEM DE MALPASSET (FRANÇA) (1959)

Uma barragem em abóbada de betão, localizada na Riviera Francesa, a sul de França, com 66m de altura, e um volume máximo da albufeira de 47 106m³. A obra tem início em 1952, e fica concluída em apenas 2 anos. O enchimento da albufeira processa-se de forma gradual durante 5 anos, sendo o nível pleno da mesma atingido a 2 de dezembro de 1959. Nesse mesmo dia, e pela primeira vez, decide-se abrir o descarregador de fundo às 18 horas, que se mantém aberto durante 1 hora e 30 minutos. No dia seguinte, às 9 horas e 10 minutos dá-se uma enorme explosão, e 3 minutos depois verifica-se o colapso total da barragem (figura 3), a destruição total da região (figura 4) e a morte de 433 pessoas (Pinto, 2008).

A comissão de inquérito consegue apurar que o colapso da barragem se dá devido a uma pequena falha na fundação, a cerca de 30 m a jusante e inclinado 45° com a vertical. Devido à pressão da água, a parte de montante da fundação deslizou sobre a de jusante provocando uma abertura sob a estrutura de betão levando ao escoamento súbito da água da albufeira e à instabilidade da abóbada. (Pinto, 2008).

Este colapso de barragem torna-se histórico, pois é a partir deste acontecimento que a França conhece a legislar sobre barragens, reconhecendo a necessidade de estudos sobre os maciços rochosos, assim como o estudo das características do vale a jusante de barragens.

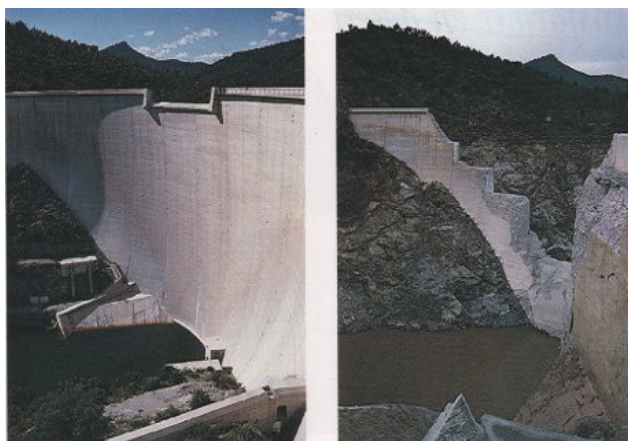


Figura 3 - Barragem de Malpasset, antes e depois do acidente (Marques, 2014)



Figura 4 - Riviera Francesa após o acidente ((<http://dingeengoete.blogspot.pt/>))

• BARRAGEM DE VAJONT (ITÁLIA) (1963)

Barragem de betão em arco de forma esbelta, com 260m de altura (figura 5), construída nos alpes italianos, com o objetivo de exploração de energia elétrica. O fim da obra acontece em 1960, e 3 anos depois verifica-se o primeiro enchimento. Chuvas excepcionais acontecem no verão de 1963, levando ao aumento rápido do nível da albufeira, e ao deslizamento alarmante dos taludes da mesma, procedendo-se de imediato ao seu esvaziamento. Já em setembro do mesmo ano, novamente chuvas voltam a aumentar o volume da albufeira, limitando a capacidade de esvaziamento, saturando os maciços dos encontros tornando-os mais instáveis. A 8 de outubro, conclui-se que os taludes rochosos instáveis eram 5 vezes superiores ao que tinham previsto inicialmente, decidindo-se de imediato abrir o descarregador de fundo ao máximo. No entanto no dia seguinte, um volume de 240 milhões de m³ de maciço rochoso deslizam sobre a albufeira a 30m/s, provocando uma onda de inundação 40m acima do nível anterior da albufeira, verificando-se o galgamento da barragem com uma onda que atinge 99m acima do coroamento. A barragem não ruiu, mas 2 minutos após o deslizamento a Vila de Longarone, situada a 1,5 km a jusante da barragem, é atingida por uma onda de 70m que dura 15 minutos, matando a totalidade dos seus 2600 habitantes (figuras 6 e 7) (Pinto, 2008)

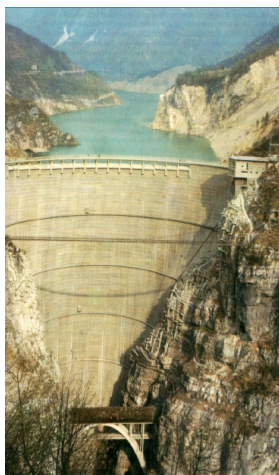


Figura 5 - Barragem na atualidade (Viseu, 2009)



Figura 6 - Vila Longarone após o desastre (fonte: gettyimages.com)



Figura 7 - Longarone, antes e depois do desastre (Pinto, 2008)

• BARRAGEM DE TETON (EUA) (1976)

Barragem de aterro, construída em materiais argilo-siltosos, possuía uma cortina corta-águas, e uma linha de furos na cortina de injeções, com um núcleo central de 93m de altura. É construída pela Bureau of Reclamation (USBR) em Idhao, no ano de 1975, e seu enchimento é um processo rápido. Em junho de 1976 dá-se uma rutura gradual da barragem (figura 8), sendo a causa da mesma atribuída à erosão interna no núcleo, pela passagem de água em juntas de compartimentação do maciço rochoso vulcânico da fundação e encontros.

A barragem de Teton possuía já um Plano de Emergência, que se mostrou eficaz uma vez que da zona de risco do vale a jusante, onde residiam 25 000, onze perderam a vida, sendo que 8 000 pessoas foram evacuadas com êxito em 2 horas (Pinto, 2008).



Figura 8 - Rutura da barragem Teton (Viseu, 2009)

• BARRAGEM DE GOHOU (CHINA) (1993)

Barragem de cascalho com uma cortina de betão armado a montante, de 71 m de altura. O seu primeiro enchimento acontece em 1989, nesse mesmo ano, quando se estava próximo de atingir o nível pleno de armazenamento, junto à saia do aterro, no paramento de jusante, surge água, procedendo-se de imediato a uma reparação com sucesso. Já em 1991, volta a verificar-se um caudal de infiltração concentrado no talude de jusante, procedendo-se novamente a uma reparação. No entanto descorou-se a inspeção na zona de montante que estava danificada e permitia a passagem de água. A 26 de agosto de 1993, a albufeira atinge o nível de pleno armazenamento, sendo que 20 horas e 30 minutos ouve-se um ruído, constatando-se a existência de água a fluir no paramento de jusante. Uma vila situada 13km a jusante da barragem é atingida por uma onda de inundação às 23 horas e 50 minutos. Conclui-se que a rutura se deveu a uma infiltração excessiva através de uma fenda na cortina a montante, conduzindo ao arraste do material de aterro demasiado fino para exibir um comportamento adequado à estabilidade hidráulica (Pinto, 2008).



CAPITULO 3 – AS BARRAGENS E A GESTÃO DE RISCO

Neste capítulo apresenta-se uma pequena súmula descritiva do funcionamento de uma barragem, assente na caracterização dos diferentes tipos de barragens que as originam e respetivos órgãos. Esta caracterização possibilitará uma melhor compreensão do funcionamento de uma barragem, essencial para a caracterização e gestão do risco associadas a estas estruturas hidráulicas.

3.1 FUNCIONAMENTO DAS BARRAGENS

3.1.1 TIPOS DE UMA BARRAGEM

Existem diferentes critérios para classificar barragens, sendo que o mais frequente é basear-se na sua importância, finalidade principal, materiais e tipos de estrutura.

Quanto à sua importância as barragens podem ser classificadas como grandes ou pequenas, sendo que uma barragem grande é admitida pela Comissão Nacional de Grandes Barragens, como tendo mais de 15m de altura, contadas desde o coroamento até ao ponto mais baixo da fundação. Podem ainda ser classificadas como grandes barragens as que possuam altura entre 10m e 15m desde que possuam um coroamento superior a 150m ou, volume armazenado igual ou superior a 1 milhão de m³ ou, o caudal de ponta de cheia seja superior a 2000m³/s ou, existindo problemas especiais de fundação, ou ainda, barragens com projetos não convencionais. Pequenas Barragens serão todas as restantes. (Quintela, 2009)

Relativamente à sua finalidade principal as barragens podem ser classificadas como barragens para criar albufeiras, onde o principal objetivo é o armazenamento de água em excesso em épocas húmidas para poder ser utilizadas em época de seca. Podem ter como finalidade a derivação de água para condutas ou canais com fins muito diversos como o consumo público, rega, produção de energia, isto sem criar albufeira de regularização. Podem ainda ser classificadas como barragens de retenção, onde o principal objetivo é reter parte do material sólido afluente ou deter temporariamente as cheias, evacuando um caudal máximo compatível com a capacidade do leito existente a montante, evitando a inundação de algumas zonas. Estas barragens em algumas situações têm mais que uma funcionalidade (Quintela, 2009).

Quanto aos materiais e estruturas podemos ter barragens de betão, que se subdividem em barragens de gravidade, abóboda e contrafortes, menos frequente são as barragens de alvenaria. As barragens de gravidade, construídas em betão, acabam por ter a sua estabilidade assegurada devido ao seu peso próprio. O seu perfil transversal é aproximadamente triangular, com o seu paramento de montante vertical ou subvertical. As barragens abóboda apresentam curvatura para montante, com o objetivo de transmitir pressão hidrostática à fundação e aos encontros, tirando partido da



resistência dos arcos á compressão, permitindo desta forma também uma redução significativa de volume de betão em relação às barragens de gravidade. As barragens de contrafortes apresentam uma estrutura contínua a montante, que assegura a estanquidade, suportada a jusante pelos contrafortes. Barragens de aterro são as mais comuns, o corpo da barragem faz-se utilizando apenas materiais em estado natural, normalmente explorados no próprio local, sem a adição de material aglutinante, e com um mínimo de intervenção humana (Quintela, 2009).

3.1.2 DESCARREGADORES DE CHEIAS

Os descarregadores de cheias são órgãos de segurança da albufeira, destinam-se a possibilitar a passagem de cheias para jusante da barragem. Estes órgãos exigem uma grande fiabilidade. O seu funcionamento em más condições, ou a sua insuficiência em relação ao caudal efluente pode por em perigo a barragem, que mesmo com uma destruição parcial pode ter consequências catastróficas, dependendo do volume da albufeira e da ocupação do vale a jusante (Quintela, 2009).

Estes órgãos são classificados segundo a sua localização e ao controlo de caudal e ainda segundo o percurso da lâmina líquida e o modo de dissipação de energia.

Os descarregadores sobre a barragem (figura 9) podem aplicar-se a barragens de betão de qualquer tipo, podendo a descarga efetuar-se livremente ou controlada por comportas. A lâmina líquida pode atingir diretamente o leito do rio ou ser guiada por um canal que se apoia na totalidade ou em parte na barragem, até um trampolim de saída, ou até uma estrutura de dissipação de energia (Quintela, 2009).



Figura 9 - Barragem do Alto Cávado (fonte: panoramio.com/photo/7885621)

Descarregadores de orifícios através da barragem (figura 10) são aplicados em barragens de betão de qualquer tipo e são controlados por comportas. A lâmina líquida, para jusante do orifício, segue livremente atingindo o leito do rio próximo do pé da barragem, se for de carga

pequena, ou longe desta se se tratar de orifício de carga elevada, ou ainda numa bacia de dissipação de energia. As soluções de queda livre exigem rocha de boa qualidade na zona do impacto (Quintela, 2009).



Figura 10 -Barragem da Caniçada (fonte: Paula – meteo.pt)

Descarregadores em poço (figura 11). Mais usual em barragens de aterro, podendo ser vertical ou inclinado, seguidos de galerias sob a barragem ou de um túnel numa das encostas adjacentes à barragem. É comum este tipo de descarregadores, por razões estruturais e de economia, permitirem o aproveitamento das condutas ou túneis, que, em primeira fase das obras, foram utilizados para o desvio provisório do caudal. São mais vantajosos em certos casos, pois permitem a utilização de parte das galerias ou condutas a jusante do poço (Quintela, 2009; Mendonça 2013).



Figura 11 - Descarregador em poço - Barragem de Paradela

Descarregadores de cheias de emergência, (figura 12) são utilizados para funcionar na emergência de ser excedido o caudal de dimensionamento do descarregador principal (Quintela, 2009).



Figura 12 - Descarregadores de emergência da Barragem de Venda Nova

3.1.3 DESCARREGADORES DE FUNDO

Os descarregadores de fundo (figura 13) são órgãos acessórios às barragens destinados a assegurar o esvaziamento total ou parcial da albufeira, na eminência de rotura ou em caso de reparação; ou ainda no controlo da subida do nível da água na albufeira. Estes órgãos podem ainda contribuir para a passagem de cheias, e ser utilizados para provocar correntes de varrer para a evacuação de sedimentos acumulados no fundo da albufeira. No caso das barragens de betão os descarregadores através da barragem são normalmente blindados devido à elevada velocidade de escoamento. A regulação do caudal faz-se por meio de válvula cónica e de comporta (Quintela, 2009).



Figura 13 -Descarregador de fundo barragem Alto Rabagão (arquivo do autor)

3.1.4 TOMADA DE ÁGUA

A tomada de água, (figura 14) é a estrutura destinada á captação da água da albufeira, situada a montante da barragem. A abertura e fecho da entrada de água é efetuada através da comporta metálica de tomada de água. A comporta tem uma importância vital no que diz respeito à segurança da central, pois, em caso de uma paragem de emergência (inundação da central ou outra anomalia), esta é fechada automaticamente. Uma outra vertente da importância da comporta é permitir a manutenção das válvulas de admissão à turbina. Para evitar a passagem de elementos

sólidos, tais como ramos, e outros, que são arrastados pelas águas podendo causar danos nos grupos geradores, existe normalmente a montante da comporta uma grelha móvel, sendo possível emergir para remover os corpos sólidos neles depositados (fonte: Companhia Portuguesa de Produção de Electricidade).

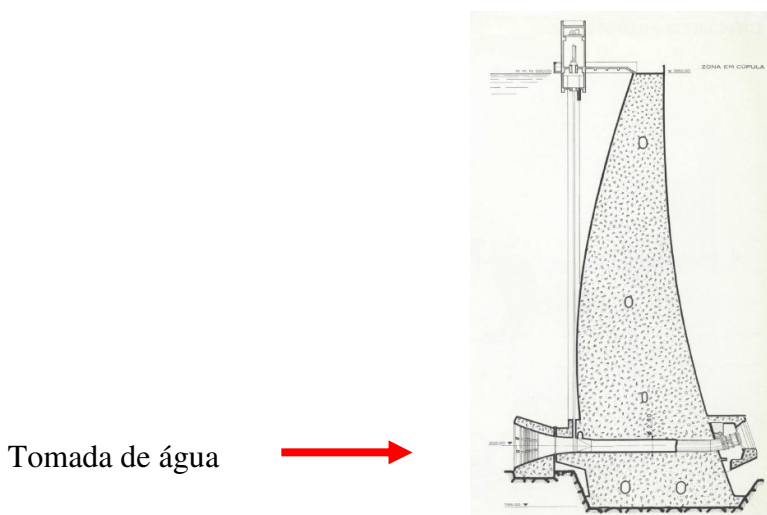


Figura 14 - Esquema de tomada de água da barragem do alto Rabagão (hidroelétrica do Cávado)

3.1.5 CONDOTA DE CARGA

A conduta de carga, (fig. 15) é constituída por uma galeria com um declive, tem como objetivo conduzir o caudal até a central hidroelétrica para posteriormente ser turbinado (fonte: Companhia Portuguesa de Produção de Electricidade, S.A).

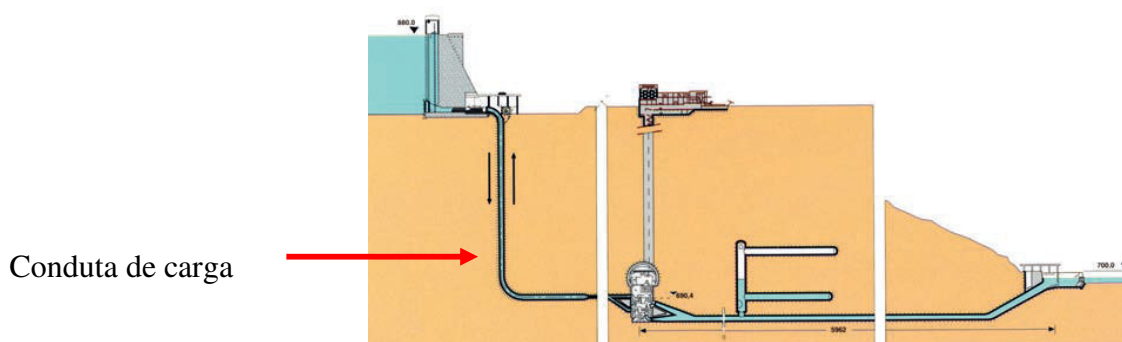


Figura 15 - esquema de circuito hidráulico do Alto Rabagão (EDP, 2012)

3.1.6 CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO

São órgãos destinados a amortecer as oscilações transitórias da pressão no circuito hidráulico (figura 16), mantendo em limites toleráveis as sobrepressões e depressões nas condutas ocasionadas por manobras intencionais ou não, como por exemplo o fecho rápido (total ou parcial)

do distribuidor. Este fecho pode originar um fenómeno designado por choque hidráulico, que não é mais do que uma onda de pressão seguida de uma depressão, que vão percorrendo a conduta sucessivamente. Localiza-se a jusante das turbinas. Aquando da abertura das turbinas, a chaminé acuta suavizando os efeitos da sobrepressão aplicados às condutas, no caso inverso, quando se dá o fecho das turbinas, produz-se uma subpressão nas condutas e a chaminé atua na forma de reservatório, alimentando as condutas (fonte: eduvisilva.com.sapo.pt).



Figura 16 - Chaminé de equilíbrio – Canastra (Brasil) (http://br.worldmapz.com/photo/75387_en.htm)

3.1.7 CIRCUITO HIDRÁULICO

É normalmente constituído por uma tomada de água, uma conduta adutora, uma câmara e uma conduta forçada até à central hidroelétrica (fonte: eduvisilva.com.sapo.pt).

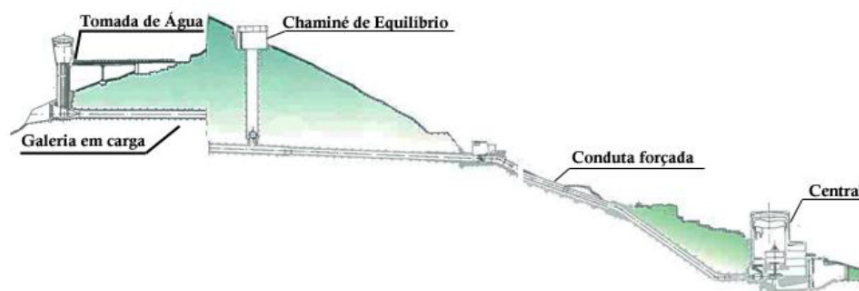


Figura 17 - Exemplo circuito hidráulico (Macedo, 2012)

O circuito hidráulico de um aproveitamento hidroelétrico (figura 17) é constituído, tipicamente, por dois trechos:

- a adução, normalmente com um pequeno declive, em canal aberto, em conduta ou túnel.
- a conduta forçada, com grande declive, entre a cota de jusante da adução e a cota da central.

3.1.8 DISSIPADORES DE ENERGIA

Os dissipadores de energia (figura 18) têm como objetivo minimizar os efeitos das perturbações introduzidas no regime natural do escoamento pela introdução de obra hidráulica.

Torna-se necessário em muitos casos que a restituição dos caudais temporariamente retidos ou desviados se faça em condições que se aproximem o mais possível das condições naturais. Para a satisfação deste princípio, as estruturas de dissipação de energia constituem pela sua função e dimensão um dos elementos fundamentais a ter em conta na conceção das obras anexas dos aproveitamentos hidráulicos, em particular das que se destinam ao controlo e regulação das cheias afluentes (Mendonça, 2013).



Figura 18 - Bacia de dissipação de energia da barragem de Salomonde

3.1.9 CENTRAL HIDROELÉTRICA

A central é um edifício que alberga os grupos turbina / alternador, que geram energia elétrica a partir da energia hidráulica, os quadros de comando e, por vezes, os transformadores. A central pode situar-se junto do pé da barragem (figura 19), aproveitando o desnível criado pela própria, ou localizar-se a jusante, por vezes a vários quilómetros, usufruindo também o desnível do rio (figura 20). No primeiro caso o circuito hidráulico é curto, sendo composto apenas por uma conduta forçada ou por várias condutas forçadas em paralelo, por vezes integradas na própria estrutura da barragem. No segundo caso a adução pode ser bastante extensa, tendo um traçado praticamente de nível, ao longo de uma das encostas do vale a jusante da barragem.

O número, o tipo e as características da turbina que equipam as centrais são seleccionados em função da queda (diferença entre os níveis de água na albufeira e do eixo das turbinas) e do caudal (fonte: eduvisilva.com.sapo.pt).

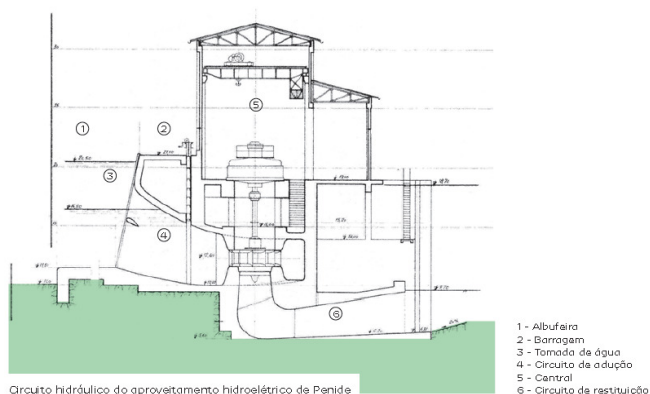


Figura 19 - central hidroelétrica de Penide (EDP,2011) Figura 20 - Central de Lindoso (REN, 2002)

3.1.10 TURBINAS

As turbinas hidráulicas transformam em energia mecânica a energia cinética possuída pela água à sua entrada na turbina e tornam-na disponível num eixo, ao qual é ligado o rotor do gerador elétrico normalmente um alternador.

As turbinas são constituídas essencialmente por duas partes: o distribuidor e o rotor. O primeiro conduz a água ao rotor, segundo a direção adequada a um melhor rendimento, e este efetua a transformação em energia mecânica.

As turbinas hidráulicas são classificadas em:

- turbinas de ação (PELTON);
- turbinas de reacção (FRANCIS e KAPLAN).

E apresentam as seguintes características: (tabela 2)

	TURBINAS		
	Ação	Reação	
	Peltron	Francis	Kaplan
Funcionamento	ao ar livre	imersa em água	
Rendimento	elevado (cerca de 93%)	mais do que as Peltron	bom rendimento
Quedas de água	250 a 2500m	150m a 250m	< 50m
Caudal	0,2 a 10m ³ /s	10 a 50m ³ /s	350m ³ /s
Figuras	21-22-23	24	25

Tabela 2 – Características das turbinas

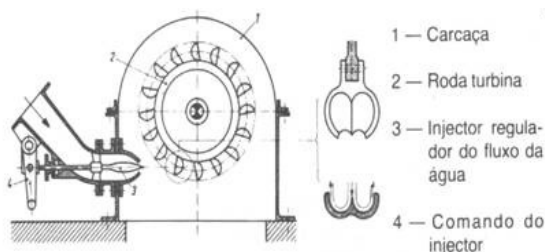


Figura 21 - turbina Peltron (fonte: eduvisilva.com.sapo.pt) www.zeco.it

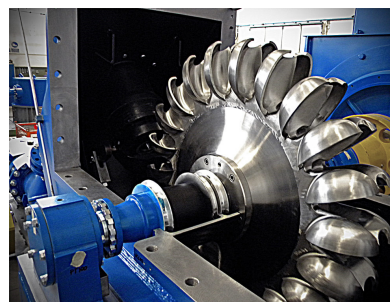


Figura 22 - Turbina Peltron (fonte:

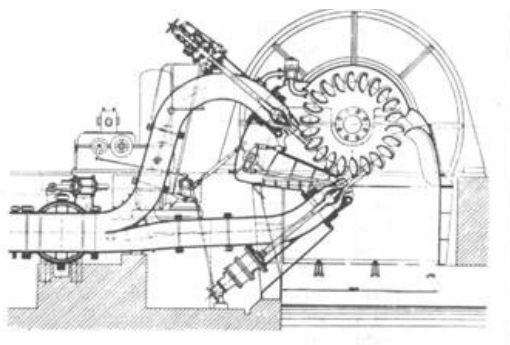


Figura 23- Turbina Peltron com 2 injetores (fonte: eduvisilva.com.sapo.pt)



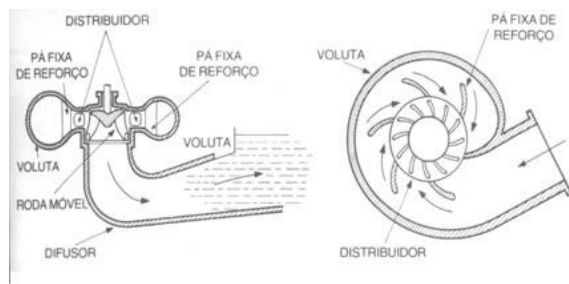


Figura 24 - Turbina Francis fonte: <http://www.global-hydro.eu/> - Turbina Francis (fonte eduvisilva.com.sapo.pt)

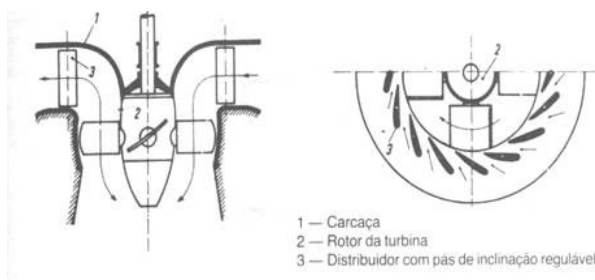


Figura 25 turbina Kaplan (fonte: eduvisilva.com.sapo.pt)

turbina Kaplan (fonte: www.zeco.it)

3.1.11 ALTERNADORES

Os alternadores (fig.26) poderão ser síncronos ou assíncronos de acordo com a potência pretendida. Os mesmos poderão funcionar como motores, nomeadamente para bombear a água. Os alternadores síncronos, como máquinas de dupla excitação poderão ainda ter a função de fazer a compensação do fator de potência. O fator potência da energia fornecida por geradores assíncronos durante as horas de cheias e de ponta não será inferior a 0.85 indutivo, devendo ser instaladas as baterias de condensadores que forem necessárias. Os geradores síncronos deverão manter um fator de potência entre 0.8 indutivo e 0.8 capacitivo perante variações na tensão da rede pública. Durante as horas de vazio não é permitido o fornecimento de energia reativa à rede (fonte: eduvisilva.com.sapo.pt).



Figura 26 - Alternador de central hidroelétrica da caniçada (fonte: moreira)



3.2 CONCEITO DO RISCO

Na questão da análise à gestão do risco, será fundamental analisar algumas definições sobre o conceito de risco, que vários autores comentam sobre o tema.

“Risco é o valor obtido a partir da consideração de consequências possíveis (designadamente, perdas de vidas e custos) de acontecimentos indesejáveis, conjugada com a probabilidade de ocorrência de fatores (exógenos e endógenos) intervenientes no processo.” (Pinto, 2008)

“associação ao conceito de incerteza, nomeadamente no que concerne o desencadeamento das perturbações ou dos eventos que conduzirão a acidentes e à quebra de segurança.” (Almeida, IST)

A noção de “risco” está fortemente ligada à de vulnerabilidade da população e dos bens. Uma maior vulnerabilidade traduz-se em maiores danos ou perdas diretos e indiretos e a uma maior dificuldade na recuperação. (Almeida, IST)

“Risco de acidente ou de incidente» é o produto dos danos potenciais pela probabilidade de ocorrência do acidente ou do incidente com eles relacionado.” (RSB)

De um modo geral o conceito de risco associado a barragens está intimamente ligado à probabilidade, estando relacionado com a possibilidade de ocorrer um acontecimento indesejável. Risco estará sempre relacionado com o conceito de incerteza que possa ser desencadeada por perturbações ou eventos que conduzam a acidentes ou a insucessos.

Alguns autores aceitam que, em domínios técnico-científicos, o conceito de risco se limite à probabilidade de ocorrência de acontecimentos desfavoráveis à segurança ou à operacionalidade de um sistema, porque na verdade é o que acontece na teoria da credibilidade dos sistemas tecnológicos e na análise estatística de alguns eventos desagradáveis.

3.3 - RISCO ASSOCIADO À SEGURANÇA DE BARRAGENS

No que respeita ao caso das barragens, o conceito de risco é de extrema importância, pois estamos a falar de um sistema tecnológico construído com a finalidade de proporcionar elevados benefícios ao Homem, através da regularização e armazenamento de água numa albufeira.

Como na generalidade dos sistemas tecnológicos, a segurança absoluta das barragens não pode ser garantida. Esta é uma realidade conhecida, desde há muito tempo, pelos técnicos e especialistas. Alguns acidentes históricos e as catástrofes resultantes, nos séculos XIX e XX, confirmam esta afirmação. No entanto, esta realidade não é totalmente reconhecida pelo público em geral e a informação ao público nem sempre é clara sobre este ponto (Almeida, 2011).

Em cada situação, a segurança pressupõe a continuidade da existência do que nos rodeia, ou da realidade tal como é considerada no presente ou é prevista no futuro, sem perturbações que



provoquem prejuízos ou danos relativamente significativos, de ordem material ou imaterial, incluindo a perda de vidas (Almeida, 2011).

Com o passar dos tempos e com os históricos de ruturas em barragens em todo o mundo, nos dias de hoje, reconhece-se, de forma clara, que existem limites à garantia da segurança dos sistemas tecnológicos. As barreiras entre o seguro e o não seguro revelam-se mais difusas e complexas.

As mortes associadas a uma eventual rutura de barragem motivaram a que, na segunda metade do sec. XX, se iniciasse uma tendência de exigir regulamentos de segurança de barragens, que incluam não só a própria barragem, mas as áreas de inundação no vale a jusante. A França foi a pioneira nesta temática, muito devido à experiência da rutura da Barragem de Malpasset em 1959, com 433 vítimas (Almeida, 2011)

A rutura de uma barragem é um exemplo paradigmático de um tipo de acidente tecnológico muito pouco frequente, com uma escala de severidade elevada, com consequências muito significativas no vale a jusante. Note-se que a frequência dos acidentes associados a grandes barragens tem diminuído ao longo do tempo em resultado da melhoria nos conhecimentos científicos e tecnológicos e do controlo da qualidade e da segurança, respetivamente nas fases de projeto, construção e de exploração. Como ordem de grandeza pode indicar-se o valor de 10^{-4} para a frequência anual média de rutura de grandes barragens. No caso de uma barragem nova, a probabilidade estimada é tipicamente da ordem de 10^{-6} (Viseu e Almeida; 2010)

3.3.1 Risco para os vales a jusante

O risco que afeta o vale (R_{vale}) a jusante de barragens pode ser traduzido pela probabilidade de ocorrência de um evento adverso $P(\text{Evento})$, uma cheia extraordinária, por exemplo, combinada com a probabilidade de rutura dada a ocorrência desse evento $P(\text{rotura}|\text{Evento})$.

$$R_{vale} = P(\text{Evento}) \times P(\text{rotura}|\text{Evento}) \times P(N|\text{rotura}) \times N \quad (1)$$

N representa as perdas, ou seja, por exemplo, o número total de vidas em exposição.

$P(N|\text{rotura})$ é a probabilidade condicionada da ocorrência de N perdas dado que ocorreu a rutura da barragem. Esta última probabilidade condicionada de perdas ou danos é estabelecida pelo grau de perigo imposto pela cheia induzida (perigosidade da cheia) e está dependente do grau de exposição e da suscetibilidade à destruição aos quais indivíduos e bens estão sujeitos (vulnerabilidade do vale a jusante) (Viseu e Almeida, 2010).



3.3.2 Perceção do risco

Independentemente da definição que se possa adotar para o risco, cada pessoa ou comunidade no seu conjunto, tem uma noção subjetiva de risco, que envolve as noções de trepidez e de perigo, o grau de possibilidade de ocorrência do evento adverso e a avaliação de perdas ou prejuízos. Esta apreciação é o resultado de diversos fatores como o cultural, e o psicológico e envolve valores sociais que influenciam a postura de cada membro da comunidade perante a segurança e a incerteza da mesma no futuro. A perceção desse risco, a nível individual, depende sobretudo da experiência vivida e da postura perante a vida e, ainda de fatores tais como a idade, o sexo, a educação e a condição física e psicológica (Viseu, 2006).

A exposição voluntária relativamente a um perigo é um fator determinante na valorização subjetiva desse risco, dado que é mais aceitável psicologicamente do que um risco que é imposto à comunidade, como é o caso, na sua maioria, dos habitantes das áreas inundáveis a jusante de uma barragem (Viseu, 2006).

A consciência do risco, e a forma como os residentes encaram esse risco, tem particular importância na mitigação dos mesmos, sobretudo para sistemas de aviso e alerta, planos de evacuação, zonamentos de risco e exercícios de simulacro.

3.4 RISCO DE RUTURA DE BARRAGENS EM PORTUGAL

O risco de ruturas ou colapso de barragens é bastante reduzido, no entanto quando tal acontece os prejuízos são enormes, e muitas das vezes inclui a perda de vidas humanas.

Em Portugal segundo o INAG existem algumas barragens com risco de rutura extrema, nomeadamente na zona escolhida para a presente proposta de dissertação (figura 27) como é o caso da Barragem do Alto Rabagão, Venda Nova e Caniçada com risco extremo, e a barragem de Salomonde com risco elevado, e que potenciam um risco hidrológico elevado em concelhos como Barcelos, Esposende, Amares... (figuras 28 e 29). Este risco está associado aos volumes de água armazenados nestas albufeiras e essencialmente à densidade populacional do vale a jusante.

CARTA DE PERIGOSIDADE
RUPTURA DE BARRAGENS

Perigosidade

- Baixo
- Elevado
- Extremo
- Moderado

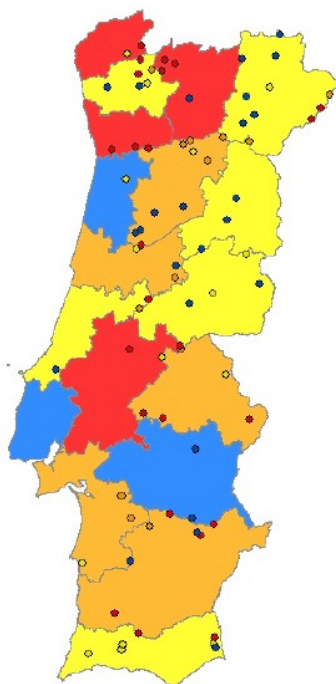


Figura 27 - Carta de Perigosidade de Rutura de Barragens (INAG - 2015)

CARTA DE RISCO
HIDROLÓGICO

- Mínimo
- Reduzido
- Moderado
- Elevado
- Máximo

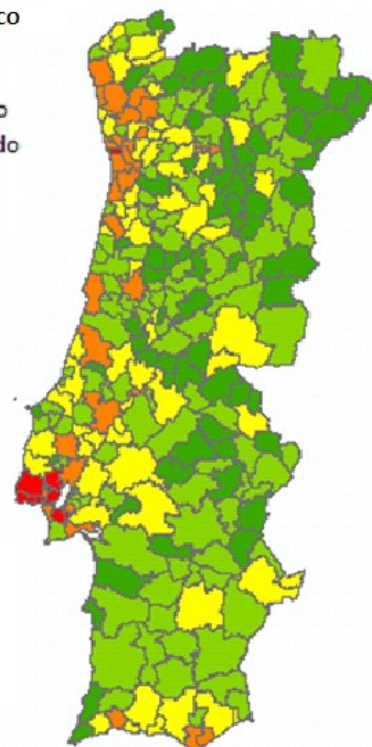


Figura 28 - Risco Hidrológico por concelho (fonte: INAG)

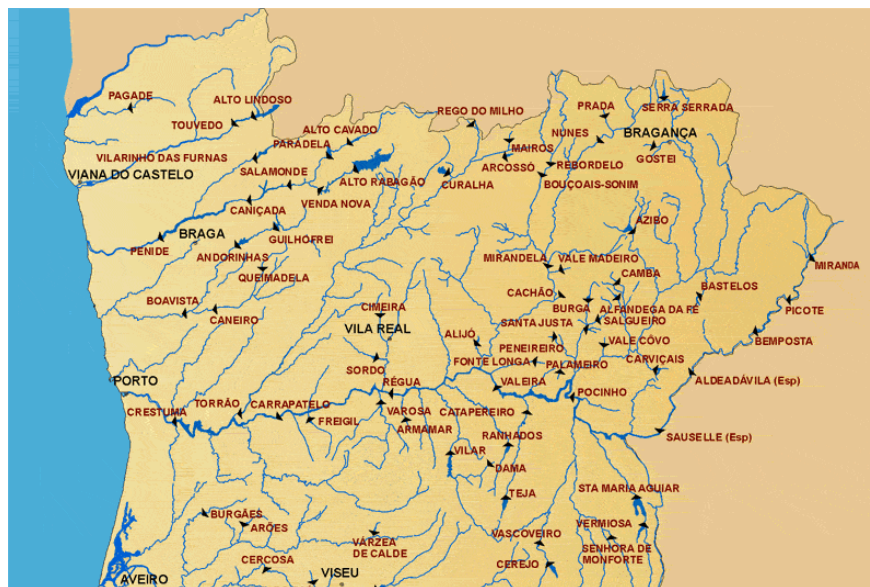


Figura 29 - Localização de Barragens a norte de Portugal (Agencia Portuguesa do Ambiente)



3.5 AVALIAÇÃO DO RISCO

A avaliação do risco nos vales a jusante de barragens torna-se imprescindível, no contexto da gestão do risco, desta forma obtém-se uma referência sobre a segurança dos mesmos e sobre a prioridade ou necessidade de intervenção de medidas estruturais ou não-estruturais (figura 30).

As metodologias para a análise e gestão deste risco assentam essencialmente em três etapas (Viseu e Almeida, 2008):

- Simulação da cheia induzida – permite caracterizar o evento perigoso e identificar as zonas onde a cheia tem características mais destrutivas.
- Caracterização da vulnerabilidade das áreas do vale a jusante da barragem que vão sofrer o impacto da cheia induzida que permite definir a classe da barragem.
- O desenvolvimento do Plano de Emergência Interno (PEI).

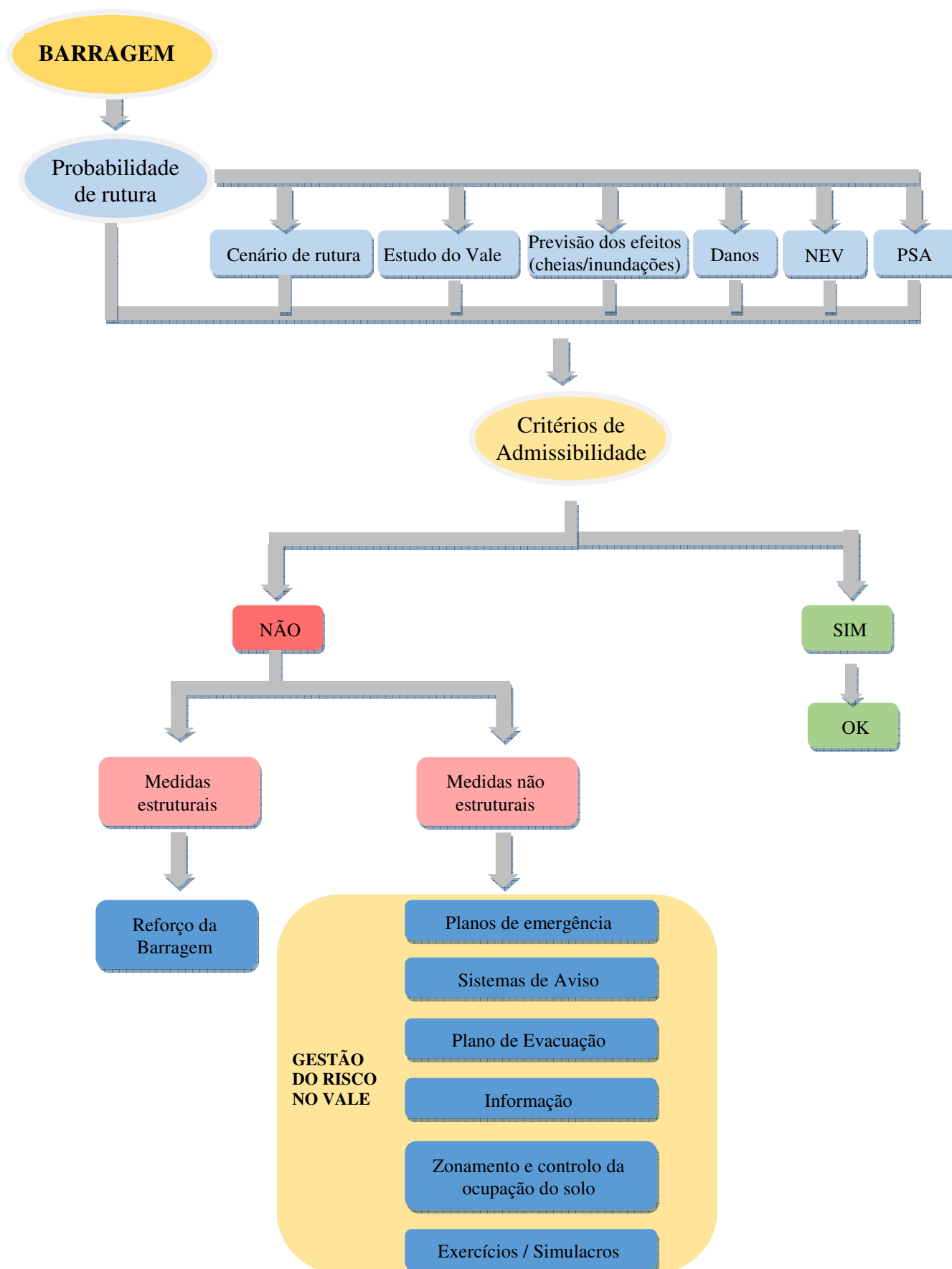


Figura 30- Esquema geral de avaliação de risco num vale com barragem (adaptado de Almeida, IST)



A análise do risco nos vales a jusante de barragens torna-se indispensável, no contexto da gestão do risco, por forma a obter um padrão sobre a segurança dos mesmos e sobre a prioridade ou carência de intervenção por meio do emprego de medidas estruturais ou não-estruturais.

Os estudos de casos históricos de cheias reais deste tipo, equiparáveis em número suficiente para terem relevância estatística, é ainda muito escasso, pelo que se deve aceitar, que para cada cenário de rutura ocorre uma cheia cujas características dependem das condições e parâmetros estabelecidos ou previstos; as características hidrodinâmicas das cheias e os efeitos (danos) ao longo do vale a jusante de uma barragem resultam da análise efetuada com as melhores técnicas possíveis e os critérios de previsão mais bem fundamentados. O risco (efetivo) global em cada vale pode ser calculado através do produto da probabilidade de ocorrência do acidente na barragem pelos danos estimados em função da área de inundação e respetiva ocupação e das características da cheia e do grau de operacionalidade dos sistemas de alerta e de proteção civil existentes (Almeida, IST).

No que respeita à avaliação dos danos (D), há que considerar ou individualizar os seguintes tipos:

DH – perdas de vidas humanas referentes a residentes, trabalhadores ou temporários (turistas ou viajantes) na área potencial de inundação, conjunto definido genericamente por população em risco (PER).

DE – danos económicos, aqueles que podem ter uma expressão direta de base monetária. Estes danos podem ser subdivididos, consoante o tipo de ocupação do solo em:

- Perdas de bens agrícolas – culturas perdidas, máquinas e alfaías agrícolas e prédios rústicos

- Perdas de gado
- Perdas de áreas florestais
- Perdas de bens residenciais – edifícios residenciais e coletivos e equipamentos sociais
- Perdas de bens em zonas industriais – instalações fabris e equipamentos ou infraestruturas económicas

- Perdas de bens em zonas comerciais – edifícios de escritórios e empresas
- Perdas de infraestruturas e serviços públicos

A População em Risco (PER) é avaliada neste campo por se referir a um conjunto estimado de pessoas, não identificadas individualmente, mas com uma elevada probabilidade ou razões fortes, para estar presente na área de inundação. Em casos particulares e no âmbito dos planos de emergência e de evacuação, pode justificar-se considerar um subconjunto específico do



PER que deverá ser objeto de medidas especiais por serem indivíduos mais vulneráveis (doentes, idosos, etc.) Este subconjunto pode ser identificado por Indivíduos Especialmente em Risco (IER).

No que se refere aos processos de decisão, de informação e de comunicação ao público, respeitantes ao risco, é importante refletir nas estimativas de danos humanos (DH), as mais notórias e decisivas, a existência, operacionalidade ou grau de eficácia de medidas especiais de segurança no vale: plano de emergência, plano de evacuação, sistema de alerta, exercícios periódicos, etc. Presentemente, esta incidência é possível com base na aplicação de critérios empíricos aproximados propostos por instituições com larga experiência como o Bureau of Reclamation dos EUA (Almeida, IST).

3.5.1 Avaliação do Risco para o vale a jusante

O risco para o vale a jusante da barragem poderá ser avaliado, estabelecendo-se a probabilidade de o evento adverso ocorrer, através de uma escala de probabilidade de ocorrência, e as respetivas consequências para a população, adaptando a metodologia de WHO (2004). Esta probabilidade de ocorrência é estabelecida através de uma apreciação sobre a estimativa de frequência com que o evento indesejável ocorre. A probabilidade de ocorrência é caracterizada em 5 classes, sendo elas o estado da estrutura da barragem, o estado dos sistemas operacionais, e um impacto provocado por terceiros, alheio aos responsáveis pelo funcionamento da barragem. (tabela 3)

Probabilidade de Ocorrência	Descrição	Peso
Quase Certo	Danos muito graves na estrutura da Barragem	5
Muito Provável	Danos graves na estrutura da Barragem	4
Provável	Sistemas operacionais insuficientes	3
Pouco Provável	Sistemas operacionais em funcionamento extremo	2
Raro	Situações excecionais (terrorismo, guerra)	1

Tabela 3 - Escala de probabilidade de ocorrência (adaptado de WHO 2004)

Da mesma forma a severidade das consequências é caracterizada em 5 classes, sendo ela classificada pelo número de população afetada e danos económicos causados (tabela 4). Esta escala de severidade das consequências foi adaptada da metodologia da Organização Mundial de Saúde (WHO, 2004), e é uma primeira abordagem no âmbito desta dissertação, que reflete necessariamente a subjectividade da autora.



Severidade das consequências	Descrição	Peso
Catastrófica	PER $\geq 10\,000$ habitantes e DE muito graves	5
Alta	PER $< 10\,000$ habitantes e DE graves	4
Moderada	PER $\geq 5\,000$ e DE moderados	3
Pequena	PER $< 5\,000$ e Pequenos DE	2
Insignificante	Impacto negligenciável	1

Tabela 4 – Escala de Severidade das Consequências (adaptado de WHO 2004)

Com base nas escalas anteriores, é obtida uma classificação de cada perigo, determinada pela priorização do risco. A partir dessas pontuações é possível estabelecer uma matriz, cruzando as pontuações da escala de probabilidade de ocorrência (linhas) com a escala de severidade das consequências (colunas) obtendo-se uma classificação do risco através do produto das pontuações das escalas. Para além disto adoptou-se uma priorização qualitativa do risco, classificado através de quatro cores de perigosidade crescente, onde verde significa sem qualquer risco, amarelo estabelece preocupação, laranja apresenta um cenário muito preocupante, e vermelho um cenário alarmante (tabela 5). Esta priorização qualitativa implicou que qualquer que fosse o valor da matriz de classificação e priorização de risco, para uma severidade de consequência catastrófica o risco fosse sempre classificado como alarmante (vermelho).

Probabilidade de Ocorrência	Descrição				
	Insignificante	Pequena	Moderada	Alta	Catastrófica
Quase Certo	5	10	15	20	25
Muito Provável	4	8	12	16	20
Provável	3	6	9	12	15
Pouco Provável	2	4	6	8	10
Raro	1	2	3	4	5

	sem risco
	preocupante
	muito preocupante
	alarmante

Tabela 5 – Matriz de classificação e priorização do Risco

Importante será referir que na utilização desta metodologia deve ponderar bom senso, de modo a distinguir situações que embora semelhantes em pontuação, apresentam perigos distintos. Eventos que ocorram raramente com consequências catastróficas devem ter prioridade para controlo sobre outro que ocorra com maior frequência, mas com impactos negligenciáveis.

3.5.2 Risco Socialmente aceitável

Após a análise do risco para um cenário de probabilidade de ocorrência de acidentes, e a avaliação das respetivas consequências, estabelece-se uma apreciação do nível de risco da decisão e tomar, eventualmente, implementar medidas mitigadoras.

Os responsáveis por tomadas de decisão como as autoridades, os especialistas, os técnicos e outros representantes da Sociedade ou do Público terão divergências de opiniões sobre o valor do risco aceitável em cada caso. Recentemente, apresentam-se critérios de aceitabilidade simplificados baseados em níveis limites para alguns riscos tecnológicos, que a Sociedade aceitaria, em função das perdas estimadas - Risco Socialmente Aceitável (RSA) (Almeida, 2004).

Considerando a importância que o número de vítimas humanas tem na apreciação do risco, os critérios de RSA são, em geral, baseados no NEV - número expectável dessas vítimas (exemplo: critério da ANCOLD (Australian National Committee on Large Dams) para acidentes em barragens). Aplicado ao caso de acidentes em barragens, o RSA fornece para cada valor de NEV, o valor limite da probabilidade aceitável referente à ocorrência, de um acidente ou evento perigoso conducente à rutura da barragem em causa (figura 31). A aceitação e aplicação do RSA neste caso, e em outros tipos de risco, tem implicações importantes no que respeita a participação do público e a responsabilidade dos diversos atores (Almeida, 2004).

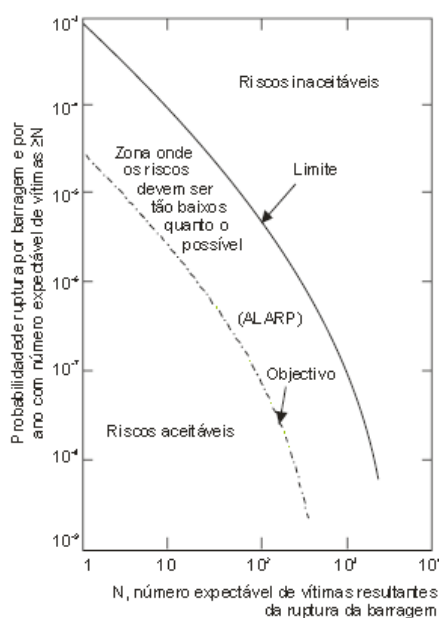


Figura 31 - Critério RSA da ANCOLD (Australian National Committee on Large Dams) – (Viseu, 2005)

3.5.3 Simulação da Cheia induzida

De forma a avaliar convenientemente os danos causados no vale a jusante da barragem, é necessário determinar as zonas inundáveis pela cheia provocada pela rutura da barragem, afetando a população, infraestruturas, instalações e ambiente. Para tal utiliza-se a simulação da cheia



induzida que simula não só a propagação da cheia ao longo do vale como o processo da formação da mesma.

Os modelos existentes para efetuar esta simulação podem ser agrupados em três categorias (Viseu, 2006):

- modelos baseados em equações empíricas de previsão: expressões que relacionam o caudal máximo efluente da brecha de rotura com as características da barragem ou albufeira (altura, volume armazenado ou outra variável que compreenda estas duas características). Estas expressões são desenvolvidas tendo por base estudos de casos, derivados de roturas históricas, e apenas é possível determinar o caudal máximo efluente, não simula a formação da brecha, nem definem o hidrograma efluente da mesma.

- modelos paramétricos: define a geometria da brecha (largura e forma final) e o tempo de rotura, fazendo uso do tratamento estatístico da informação que é obtida das roturas históricas ou de resultados experimentais. Com estes modelos é possível simular a evolução da brecha em função do tempo e calcular o hidrograma resultante segundo princípios da hidráulica.

- modelos baseados em métodos físicos (figura 32): simulam a evolução da brecha e calculam o hidrograma resultante da rotura de barragens usando o modelo de erosão baseados na realidade física do problema, ou seja, em princípios hidráulicos, transporte sólido e mecânica dos solos. Estes modelos são normalmente desenvolvidos acoplado as equações do regime variável às equações da erosão e do transporte sólido.

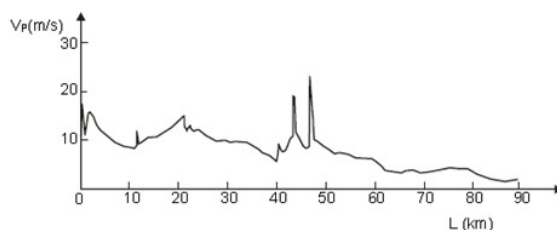


Figura 32 - Variação da velocidade de propagação da frente de onda (Barragem de Laouzas) (Marques, 2014) Resultados através de modelo físico

3.5.4 Propagação da cheia induzida

As cheias induzidas são frequentemente mais perigosas que as cheias naturais por duas grandes razões; por um lado o facto de a existência de uma barragem a montante pode dar a perceção de uma falsa segurança á população e resultar no esquecimento de práticas correntes e tradicionais de prevenção de cheias; por outro lado podem ser macro cheias (caracterizadas por valores pouco usuais de alturas de água e velocidades de escoamento) ou ainda cheias abruptas, cuja subida dos níveis da água é mais rápida do que a subida associada a uma cheia natural, o que diminui o tempo disponível para avisar e evacuar as pessoas (Almeida, 2011).

A simulação do processo de propagação da cheia induzida (figura 33) é obtida a partir das equações da hidrodinâmica, correspondente a escoamentos de superfície livre (dinâmicos e variáveis). Os modelos hidrodinâmicos computacionais mais conhecidos são os DAMBRK (Boss Dambrk, 1991) e HEC-RAS (Usage, 2002). Com este tipo de modelos é possível determinar valores máximos dos caudais de ponta de cheia, velocidades máximas de escoamento, níveis máximos de escoamento e tempos de propagação do pico da frente de onda, com os respetivos instantes de chegada a cada uma das secções do vale a jusante. O nível máximo atingido pelo escoamento permite delinear as áreas a jusante onde ocorrem inundações e definir o mapa de inundações (Almeida, 2011).



Figura 33 - Propagação da cheia induzida no vale a jusante (Marques, 2014)

3.5.5 Caracterização do vale a jusante

Nesta etapa procede-se à compilação de toda a informação relevante, disponível relativamente ao vale a jusante com interesse para o estudo (normalmente mais de 30km), recomendando-se uma visita de inspeção ao vale a jusante. (Almeida, 2011)

Na caracterização do vale a jusante deve ser elaborada uma estimativa do número de residentes. Com efeito o RSB define a classe da barragem pelo número de residentes no vale a jusante, daí a relevância deste parâmetro.

A estimativa do número de residentes no vale a jusante pode ser efetuada a partir do recurso a diferentes fontes de informação nomeadamente mapas topográficos (quando atuais), como é o caso de cartas militares (escala 1:25 000), ortofotomapas (escala 1:10 000), plantas de ordenamento do território dos planos diretores municipais (PDM).

A caracterização da ocupação do vale a jusante obriga, adicionalmente, à realização de trabalho de campo para proceder á recolha de informação. Para esta informação pode recorrer-se às imagens disponibilizadas pelo software Google Earth.

Em Portugal outro instrumento fundamental para a caracterização do vale a jusante são os dados estatísticos apurados pelo Instituto Nacional de Estatística (INE), através de recenseamentos gerais da população e das habitações (último 2011) publicados nos respetivos censos.

3.6 MITIGAÇÃO DO RISCO

A mitigação do risco passa sobretudo por atenuar e reduzir o mesmo, através da gestão operacional nas barragens e no vale a jusante. No entanto a tomada de decisões dependente de diversos fatores, nomeadamente a perceção pública ao risco e questões de ética (figura 34).

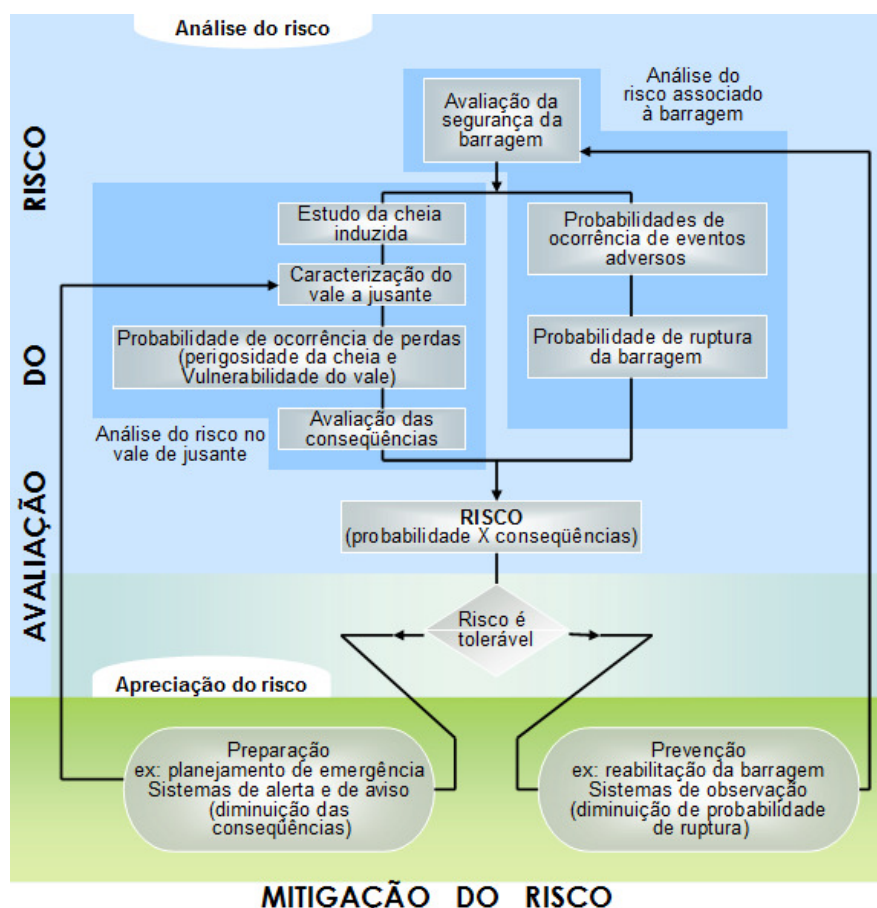


Figura 34 - Gestão operacional do risco nas barragens e vales a (Viseu, 2006)

A valorização do risco orienta para uma primeira seleção natural de admissibilidade, tolerância e nível de risco adequado que inclui a seleção de medidas de mitigação consistentes (figura 35).

O risco deverá ser tão baixo quanto possível, nesse sentido, o processo de mitigação do mesmo deverá ser cíclico.

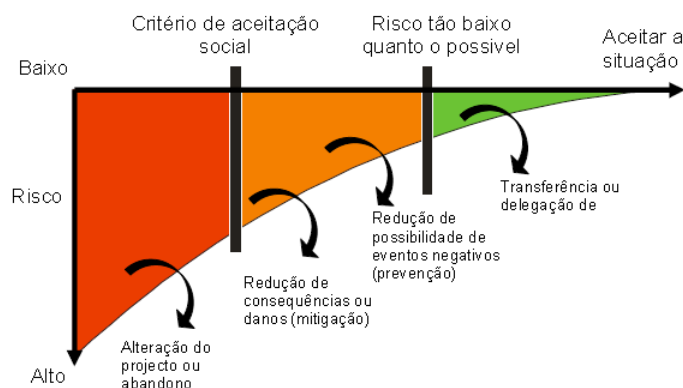


Figura 35 - Filosofia geral de gestão de risco (Almeida, 2004)

3.7 LEGISLAÇÃO NACIONAL

As barragens, logo a seguir às centrais nucleares, são das edificações de maior risco construídas pelo homem, devido aos danos potenciais que podem causar.

Desde há cerca de 25 anos, os responsáveis, a nível mundial, pela garantia da segurança de barragens mudaram a sua atitude. Começaram a dar uma importância crescente às eventuais perdas de vidas humanas no caso da existência de acidentes. Assim, em vez da dimensão da obra, altura e volume da albufeira, tem-se tomado em conta, de um modo crescente, a vulnerabilidade dos aglomerados populacionais existentes a jusante das barragens. Esta evolução é perceptível ao comparar o primeiro Regulamento Português de Segurança de Barragens (RSB), de 1990, com a versão atual, de 2008 resultante da sua revisão (Pinto, 2009).

O novo Regulamento de Segurança de Barragens (RSB) foi aprovado pelo DL 344/2007 de 15 de outubro e aplica-se a:

- a) A todas as barragens de altura igual ou superior a 15 m;
- b) Barragens de altura igual ou superior a 10 m cuja albufeira tenha uma capacidade superior a 1 hm³;
- c) Às barragens de altura inferior a 15 m que não estejam incluídas na alínea anterior e cuja albufeira tenha uma capacidade superior a 100 000 m³;
- d) Outras barragens que, em resultado da aprovação de projetos ou de estudos de avaliação de segurança, sejam incluídas.

Como novidade o novo RSB classifica as barragens em função dos danos potenciais associados à onda de inundação no vale a jusante (figura 36), para esta classificação um fator importante é a população residente no vale a jusante.

Classe	Ocupação humana, bens e ambiente
I	Residentes em número igual ou superior a 25.
II	Residentes em número inferior a 25; ou Infra-estruturas e instalações importantes ou bens ambientais de grande valor e dificilmente recuperáveis ou existência de instalações de produção ou de armazenagem de substâncias perigosas.
III	As restantes barragens.

Figura 36 - Quadro de Classes de Barragens (Regulamento Segurança de Barragens)

Qualquer barragem (pública ou privada) que em caso de rotura ponha em perigo mais de 24 habitantes é obrigada a ter planeamento de emergência.

As entidades envolvidas no RSB são:

INAG - competência genérica de controlo de segurança de barragens (Autoridade)

LNEC - consultor em matéria de controlo de segurança das barragens

ANPC - entidade orientadora e coordenadora das atividades de proteção civil ao nível nacional

Em Portugal, segundo a ANPC, cerca de 150 barragens estarão obrigadas a efetuar um planeamento de emergência.

Neste RSB, foi introduzida uma novidade, nele é claramente distinguido o Plano de Emergência Interno (PEI) e o Plano de Emergência Externo (PEE), sendo que no conjunto, os dois formam o Planeamento de Emergência (PE).

Plano Emergência Interno (PEI) + Plano Emergência Externo (PEE) = Planeamento de Emergência (PE)

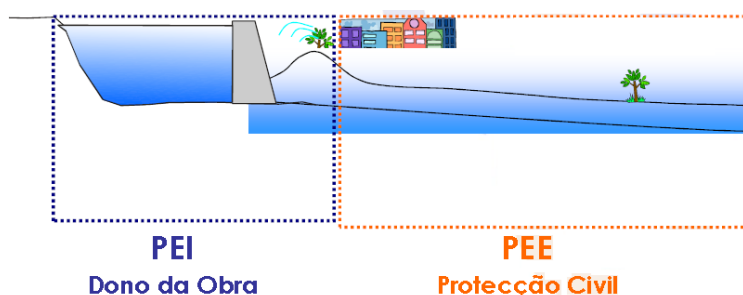


Figura 37 - Responsabilidade dos Planos de Emergência (Sá,2008)

O PEI é da responsabilidade do dono de obra (figura 37) e, propõe o aviso à população (figuras 38, 39 e 40), e alerta aos serviços e agentes de proteção civil; a conservação e manutenção dos sistemas de alerta e aviso considerado no PEI, promoção de ações de sensibilização da

população que devem ser articuladas com INAG e proteção civil para a zona de intervenção do PEI.



Figura 38 - Sinalização de emergência (Sá, 2008)



Figura 39 - Aviso sonoro (Sá, 2008)

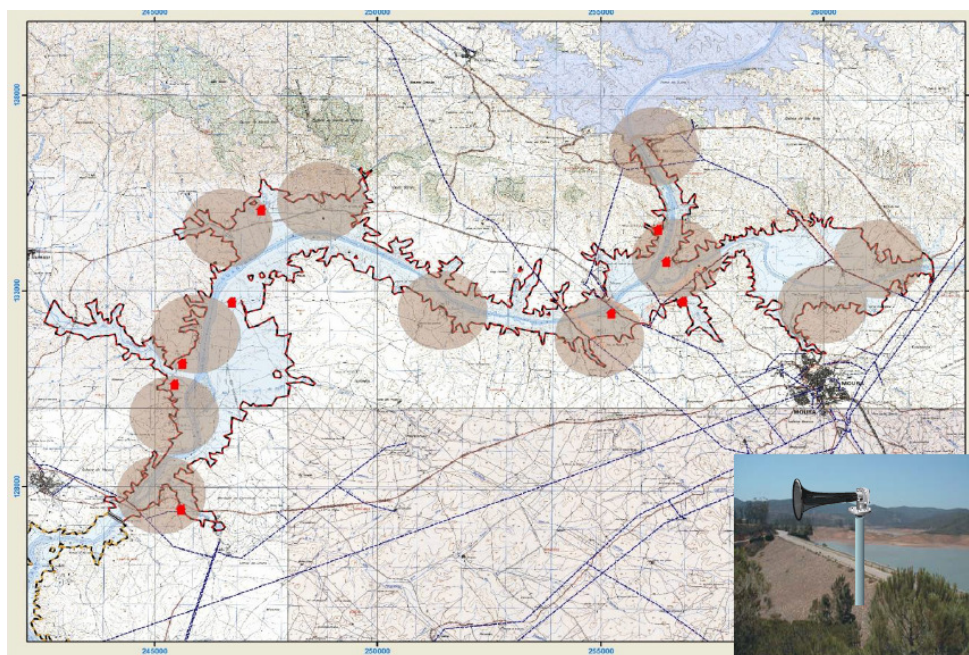


Figura 40 - Exemplos de raio de alcance do aviso sonoro. Exemplo barragem do Alqueva. (Viseu e Almeida, 2011)

A zona de intervenção do PEI resume-se a ações da barragem e vale logo a jusante (figura 41), referindo-se à zona do vale percorrido em 30 minutos pela onda de inundação, com um mínimo de 5 km (Zona de auto-salvamento - ZAS), esta delimitação corresponde à área em que o aviso à população deve ser dado diretamente a partir da barragem.

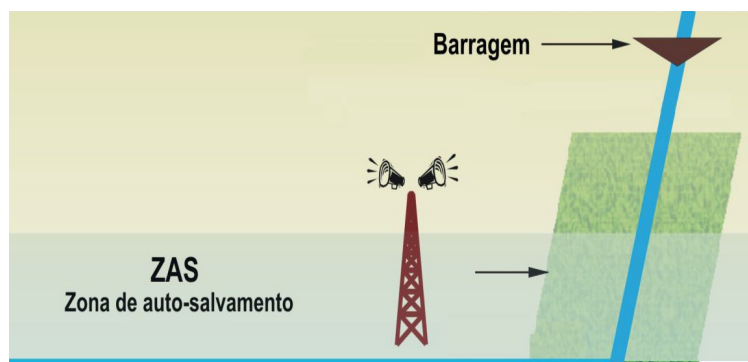
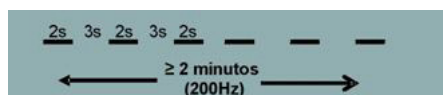


Figura 41 - Delimitação da zona de intervenção do PEI (Sá, 2008)

Para os sistemas de aviso do ZAS deverão ser as sirenes os equipamentos preferenciais de suporte à emissão dos avisos. O tipo de aviso sonoro está definido em Normas aprovadas pela Comissão de Segurança de Barragens.

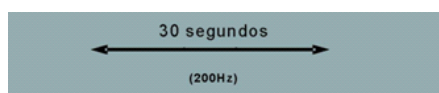
Toque intermitente durante 2 minutos

- Início do Aviso do sinal de evacuação



- Toque contínuo durante 30 segundos

- Fim do Aviso do sinal de evacuação



- Toque contínuo durante 2 minutos

- Sinal de descarga elevada



O PEI é submetido pelo Dono de Obra e aprovado pelo INAG após parecer da ANPC.

É no PEI que se devem encontrar informações importantes, como a descrição do vale, incluindo:

- Caracterização geral do clima
- Povoações existentes;
- Tipo de ocupação social (rural, industrial, etc.);
- Infraestruturas significativas (ex: rodoviárias, ferroviárias, etc.)
- Áreas naturais com estatuto de proteção;
- Património com interesse histórico;

E ainda deve incluir caracterização da onda de inundação, nomeadamente:

- instante de chegada da frente da onda
- nível máximo de cheia atingido (altura e cota)
- duração da cheia;
- velocidade máxima da onda de inundação;
- caudal máximo



Com o objetivo de avaliar os riscos decorrentes de qualquer situação de emergência, deve existir no PEI uma divisão das situações de emergência por grau de gravidade, correspondendo cada um dos graus a um nível de alerta, para o qual devem ser tomadas medidas específicas (figura 42), o qual deverá ser ajustado em função das condições específicas de cada barragem.

Nível de Alerta	Situação	Medidas a tomar pelo dono de obra
Azul Nível 0	Situação normal de rotina, ou Detecção de anomalias na barragem ou outros eventos que não comprometam a segurança estrutural da barragem e dos seus órgãos operacionais nem inviabilizem o seu sistema de observação	Medidas internas de resolução da anomalia ou incidente
Amarelo Nível 1	<u>Situação 1</u> – Descargas elevadas por gestão operacional, ou <u>Situação 2</u> – Existência de anomalias ou eventos que possam vir a comprometer a segurança estrutural e/ou operacional da barragem ou os meios de observação e controlo da barragem, admitindo-se eventuais efeitos moderados a jusante da barragem: a) Detecção de anomalias nos elementos estruturais da barragem ou no sistema de observação/monitorização b) Existência de problemas nas fundações c) Existência de atividade sísmica d) Existência de outros eventos com incidência sobre a segurança da barragem	Medidas internas de resolução da anomalia ou incidente Alerta: – Serviços de Proteção Civil – Autoridade (APA) Aviso: Situação 1 - sinal de descarga Situação 2 - divulgação de informação às populações imediatamente a jusante
Laranja Nível 2	<u>Situação 1</u> – Ocorrência de cheias com elevado período de retorno, ou <u>Situação 2</u> – Situação com alta probabilidade de acidente, em que se admite não ser possível controlar a situação, afetando o vale a jusante da barragem, devido a: a) Detecção de anomalias graves nos elementos operacionais das barragens ou nos elementos estruturais da barragem b) Existência de problemas graves nas fundações	Alerta: – Serviços de Proteção Civil – Autoridade (APA) Aviso: Situação 1 - sinal de descarga Situação 2 - sinal de evacuação às populações imediatamente a jusante
Vermelho Nível 3	Situação de catástrofe inevitável (iminência de rotura da barragem) Rotura da barragem	Alerta: – Serviços de Proteção Civil – Autoridade (APA) Aviso: sinal de evacuação às populações imediatamente a jusante

Figura 42 - Quadro dos níveis de alerta (fonte: ANPC, 2009)

De acordo com a Lei de Bases da Proteção Civil (art. 50º) a elaboração do PEE depende da abrangência administrativa:

Se o vale atingido pela inundação pertencer a:

- 1 Concelho - Câmara Municipal
- 2 ou + concelhos - Governo Civil
- Concelhos de 2 distritos - ANPC

O PEE, deve incluir a realização de exercícios ao plano, a gestão das situações de emergência (figura 43) e aviso às populações fora da zona de autossalvamento, ações de sensibilização da população no âmbito do PEE., segundo a legislação em vigor

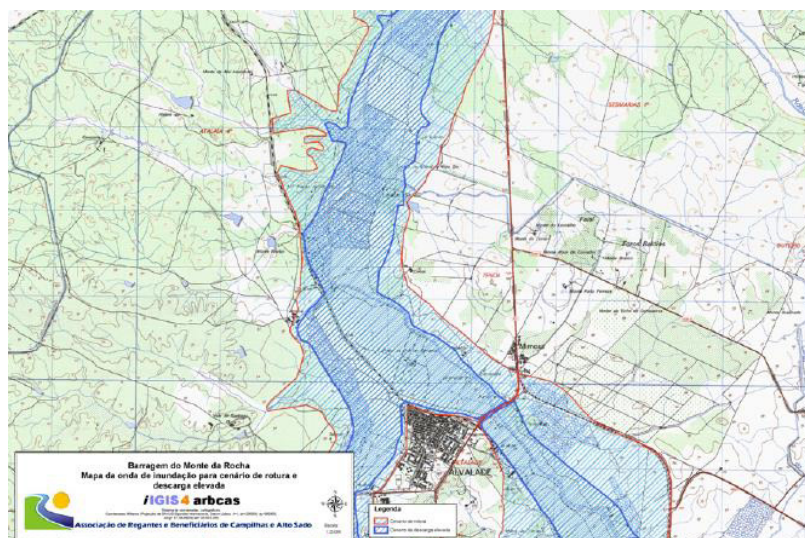


Figura 43 - Mapa de inundações da Barragens do Monte da Rocha (Associação de Regantes e Beneficiários de Campilhas e Alto Sado, 2010)

A experiencia portuguesa na elaboração de planos de emergência associados ao risco de habitar em vales a jusante de barragens realça a vantagem de organizar estes planos (figura 44) com base em cinco ações distintas (Viseu e Almeida, 2009):

- deteção e anomalia
- tomada de decisão
- notificação
- aviso
- Evacuação

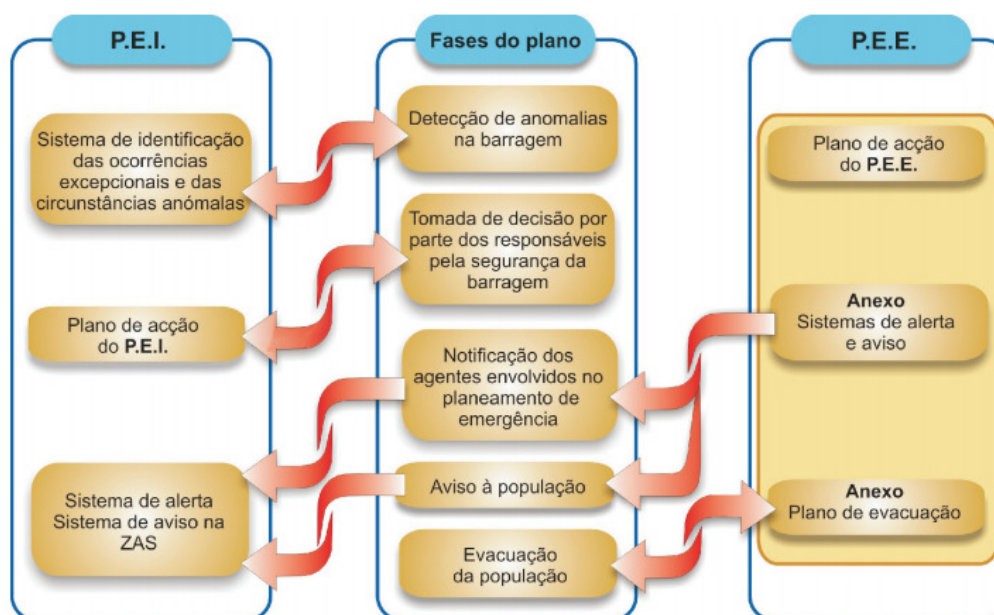


Figura 44– Organização entre PEI, o PEE e as fases de emergência (Viseu, 2006)



A primeira legislação Portuguesa sobre barragens surge apenas em finais da década de 60 do século passado, (figura 45) e apenas referindo-se a pequenas barragens de Terra, numa altura em que por exemplo a França, já introduzia na sua legislação estudos sobre maciços rochosos das barragens de betão.

Em Portugal o regulamento de segurança de barragens surge 20 anos após a primeira legislação, sendo que as normas de projeto de barragem surgem com mais de 20 anos após a primeira legislação. Um grande número de barragens portuguesas foi construído em anos em que não existia qualquer tipo de norma ou regulamentação, mais propriamente 75% (ver figura 1).

1968	Regulamento de Pequenas Barragens de Terra (RPBT) Decreto 48373 de 8 de maio e Decreto 48643 de 23 de outubro
1990	Regulamento de Segurança de Barragens (RSB) Decreto-Lei 11/90 de 6 de janeiro
1993	Regulamento de Pequenas Barragens (substitui RPBT) Decreto-Lei 409/93 de 14 de dezembro
1993	Normas de Projeto de Barragem Portaria 846/93 de 10 de setembro
1993	Normas de observação e inspeção de barragem Portaria 847/93 de 10 de setembro
1998	Normas de construção de barragens Portaria 246/98 de 21 de abril
2007	Regulamento de Segurança de Barragens (substitui o anterior RSB) Decreto-Lei 344/2007 de 15 de outubro

Figura 45 - Histórico da Legislação de Barragens em Portugal (adaptado de Marques, 2014)

3.8 CONTROLO DE SEGURANÇA NAS BARRAGENS

A monitorização e o controle do comportamento estrutural de grandes barragens é crucial, na mitigação dos riscos associados aos vales a jusante de barragens.

O controlo de segurança de barragens baseia-se num “conjunto de medidas a tomar nas várias fases da vida da obra, contemplando aspetos estruturais, hidráulico-operacionais e ambientais, com vista a assegurar as suas condições de segurança e que, nas fases de primeiro enchimento e de exploração, deve permitir um conhecimento adequado e continuado do estado da barragem, a deteção oportuna de eventuais anomalias e uma intervenção eficaz sempre que necessário” (RSB, artigo 4º).

A observação é uma das mais relevantes atividades no âmbito do controlo de segurança de barragens, e envolve sempre quatro tipos de intervenção:

- Elaboração de planos de observação e de instrumentação das obras



- Implementação dos procedimentos previstos no plano de observação e instalação da instrumentação escolhida
- Exploração do sistema de observação
- Interpretação do comportamento e avaliação das condições de segurança

Os principais objetivos da observação de barragens são, obter dados relativos à segurança, assim como prever o comportamento futuro da barragem, verificar os modelos e critérios de dimensionamento. Para tal é necessário a elaboração de um plano de observações que defina as grandezas a medir, assim como os equipamentos para a medição, considerando-se a amplitude necessária para as grandezas a medir e a precisão que se pretende dessas leituras; instituindo com que frequência deveram ser feitas as leituras, e estabelecer critérios de interpretação das leituras, que estão associados ao tipo de equipamento utilizado e ao seu grau de erro do mesmo.

As grandezas a medir estão estabelecidas no regulamento de segurança de barragens (RSB) de acordo com o índice global de risco (EFR) (tabela 6).

Altura da barragem (m)	Deslocamentos		Tensões totais	Caudal de infiltração	Tensões neutras		Precipitação atmosférica	Sismologia
	superficiais	Internos			Piezómetros	Piezómetros sem fluxo		
<15	EFR>15 ou R>3	-	-	Total se EFR>10 R≥3	EFR>10 R≥3			EFR>9 e α1=5
15-30	EFR>10 R≥3	-	-	Total	✓	se α1=5	op	α1=5
30-50	✓	EFR>20	op	Parciais se R≥3	✓	se α1≥4	R≥3	α1≥4
50-100	✓	EDR>10 R>3	✓	Parciais	✓	✓	✓	α1≥3
>100	✓	✓	✓	Parciais	✓	✓	✓	✓

Tabela 6 - Grandezas a verificar para segurança de barragens (EFR)

Grandezas a observar:

- Nível de água na albufeira (NAA)
- Nível de máxima cheia (NMC)
- Nível de pleno armazenamento (NPA)
- Meteorologia
- Deslocamentos externos e internos
- Pressões
- Tensões

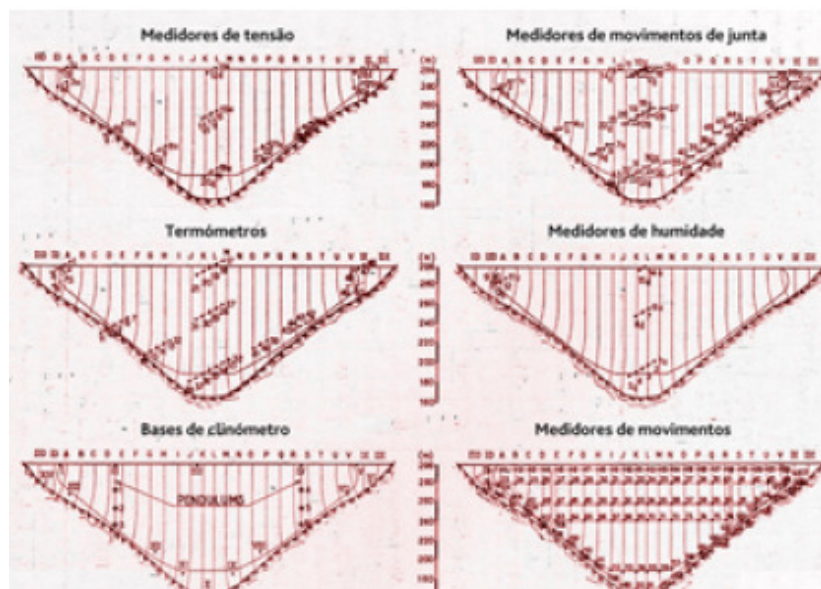
O nível de água na albufeira (NAA) é a ação que mais varia ao longo do período de vida da Barragem, sendo a grandeza que traduz a principal ação sobre a estrutura da barragem. Esta medição é feita através de escalas visíveis (escalas limnimétricas) colocadas na albufeira (figura 46), limnígrafos (registo continuo com flutuadores), transdutores de pressão.



Figura 46 - Escala Limnimetrica da Caniçada

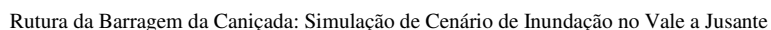
3.8.1 HISTÓRICO DE CONTROLO DE SEGURANÇA NAS BARRAGENS

Na década de 50, período de construção de um imenso número de grandes barragens de betão em Portugal, a principal preocupação era o comportamento da própria estrutura, através da observação de deslocamentos, rotações, temperaturas, extensões, movimentos de juntas em diversos pontos das obras. (figura 47) (lneec.pt/LNEC/museuvirtual/observacao_barragbetao)


Figura 47 - Plano de observação da barragem do Cabril, 1950
(lneec.pt/LNEC/museuvirtual/observacao_barragbetao)

Inicialmente utilizavam-se equipamentos de medida acústicos ou de corda vibrante, nos quais a observação se fundamentava na medição do período de vibração de um fio de aço. Mais tarde passou a ser comum a utilização de instrumentos de resistência elétrica. Todos os resultados da observação advinham de medições efetuadas no local por observadores (lneec.pt/LNEC/museuvirtual/observacao_barragbetao).

A partir dos anos sessenta começou a dar-se uma progressiva importância ao comportamento da fundação. Para além de redes de drenagem e de piezómetros para observação do comportamento hidráulico da fundação, instalam-se também extensómetros de fundação e fios-

[illegible]

Para além da observação de grandezas relacionadas com as principais respostas estruturais, a caracterização das propriedades dos materiais do corpo da obra e da fundação é muito importante para a interpretação do comportamento em obras onde se desenvolvem processos de deterioração.

44



Figura 50 - Célula de fluência in situ na barragem de Vilarinho das Furnas, 1973
(Inec.pt/LNEC/museuvirtual/observacao_barragbetao)

Nos dias de hoje o ensaio de caracterização de materiais é efetuado com recurso à medição da velocidade de propagação de ondas ultrassonoras (figura 51), medição da condutibilidade elétrica da água (figura 52), e medição de caudais e de pressões devidos à percolação na fundação (figura 53) (Inec.pt/LNEC/museuvirtual/observacao_barragbetao).



Figura 51 - medição da velocidade de propagação de ondas ultrassonoras
(Inec.pt/LNEC/museuvirtual/observacao_barragbetao)



Figura 52 - medição da condutibilidade elétrica da água



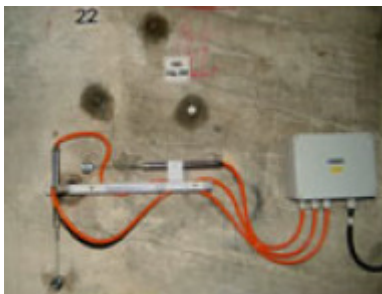
Figura 53 - medição de caudais e de pressões devidos à percolação na fundação

(Inec.pt/LNEC/museuvirtual/observacao_barragbetao)

Com o avanço das novas tecnologias das últimas décadas do século XX, surgiram também as primeiras propostas de sistemas automáticos para a recolha e arquivo de dados e resultados da observação de barragens (figura 54) (Inec.pt/LNEC/museuvirtual/observacao_barragbetao).



Medição de caudais drenados e filtrado



Medição de movimento das juntas


Medição
deslocamentos horizontais

Figura 54 - Sistemas Automáticos de recolha e arquivo de dados
(Inec.pt/LNEC/museuvirtual/observacao_barragbetao)

Os avanços científicos e tecnológicos nos procedimentos de arquivo e tratamento dos resultados da observação e nas atividades de modelação matemática do comportamento das obras, possibilitou o progresso de estudos de avaliação do comportamento e da segurança das barragens (figura 55) tendo em conta não só os resultados da observação, mas também as características dos materiais determinadas experimentalmente e os resultados dos modelos matemáticos (Inec.pt/LNEC/museuvirtual/observacao_barragbetao).

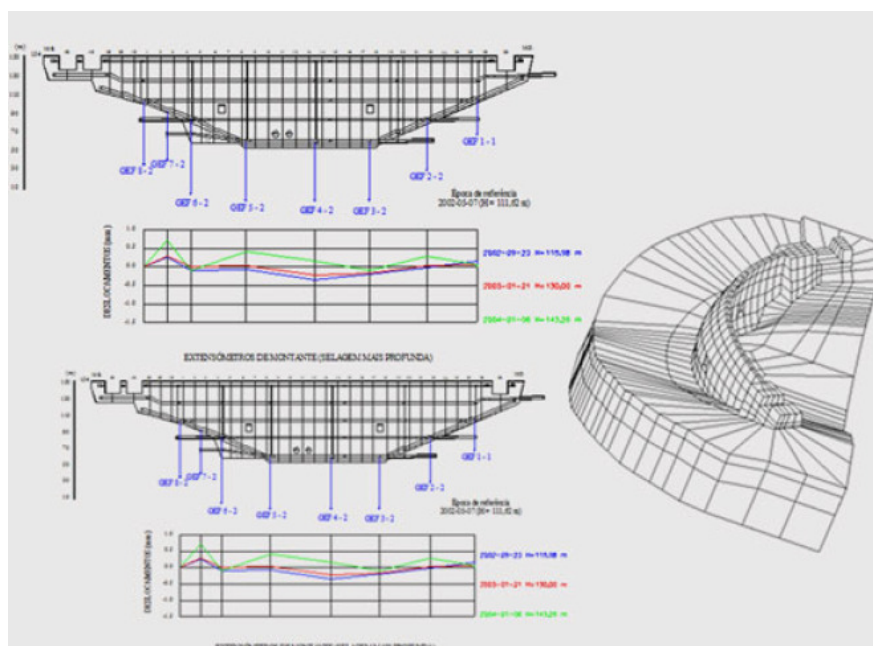


Figura 55 - Comportamento observado no 1º enchimento da barragem do Alqueva
(Inec.pt/LNEC/museuvirtual/observacao_barragbetao)

Já no início do século XXI encetou-se o desenvolvimento de um sistema integrado para tratamento de toda a informação pertinente para a avaliação das condições de segurança das barragens. Neste momento em Portugal, existem já registos e leituras de resultados da observação referentes a cerca de 70 barragens e estão instalados mais de 25000 equipamentos (lnec.pt/LNEC/museuvirtual/observacao_barragbetao).

3.8.2 SISTEMAS EMERGENTES DE CONTROLO DE SEGURANÇA NAS BARRAGENS

Num futuro já bastante próximo, face aos progressos tecnológicos emergentes, estes sistemas irão provavelmente incluir estações totais motorizadas (figura 56), permitindo registos automáticos, mais rápidos controlados remotamente.



Figura 56 - Estação total Leica

Para além das vantajosas estações totais motorizadas, estes sistemas poderão também incluir nuvens de pontos capturados com scanners de precisão (figura 57), podendo-se associar ainda a mais-valia da captura de imagem fotográfica em simultâneo (figura 58), o que constitui um poderoso auxiliar de inspeção visual.



Figura 57 - Laser scan

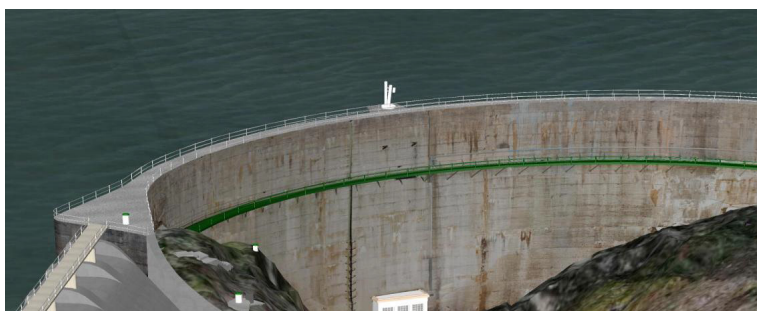


Figura 58 - Barragem do Alto Ceira: imagem obtida por Varrimento laser 3D (Almeida, -EDP 2009)

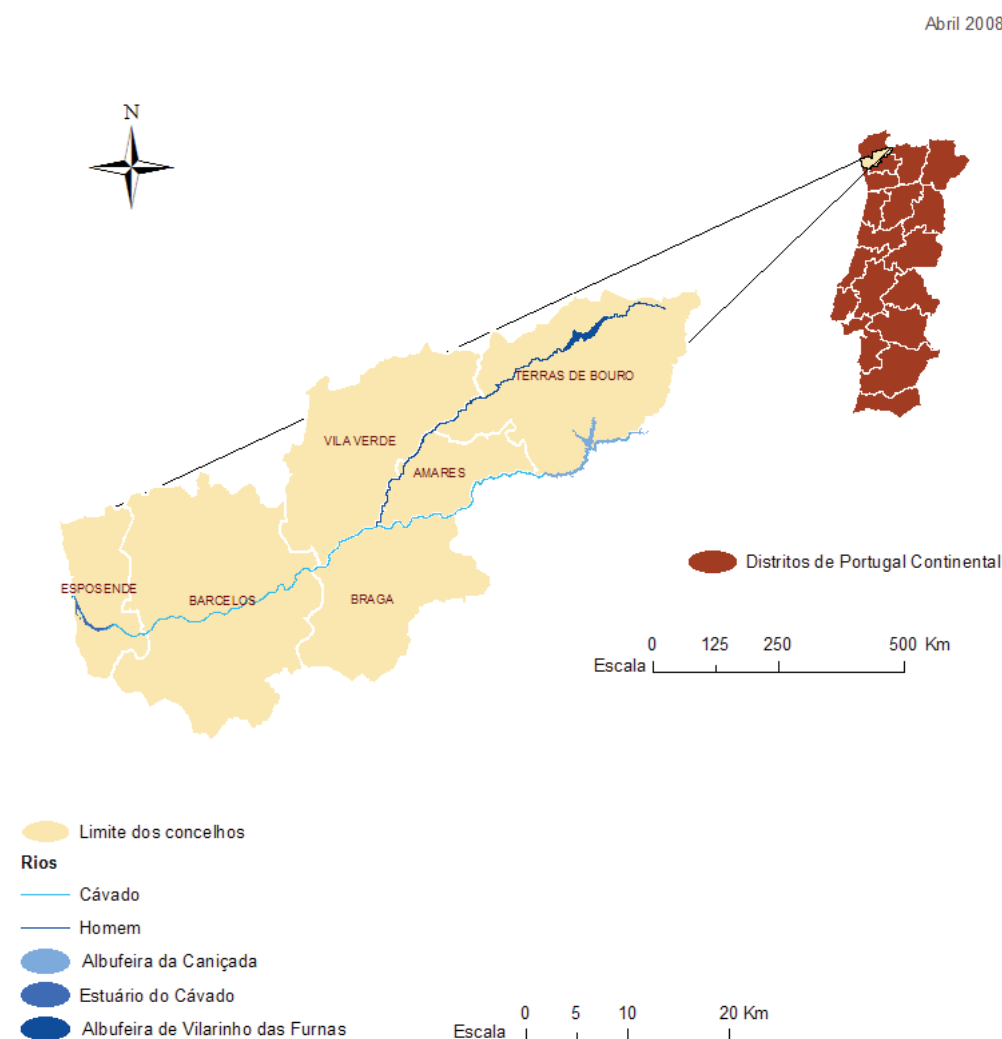
(<http://www.laser-scanning-buildings.co.uk/>)



CAPITULO 4 – DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 ENQUADRAMENTO GERAL

Para o tema desta dissertação optou-se pelo estudo da bacia hidrográfica do Cávado, localizada no Norte de Portugal Continental (figura 59). A área abrangida pela bacia hidrográfica do Cávado é de 1699 km², dos quais cerca de 256 km² e 248 km² correspondem, respetivamente, às sub-bacias dos afluentes mais importantes: o rio Homem e o rio Rabagão. Com uma largura média de 16 km e um comprimento de mais de 100 km, esta área confronta a Norte, com as bacias hidrográficas dos rios Neiva e Lima, fazendo ainda fronteira com Espanha a nordeste; a Este com a bacia hidrográfica do Rio Douro, a Sul com a bacia hidrográfica do Rio Ave, e a oeste com o Oceano Atlântico. (figura 60) (PBHC - Plano da Bacia Hidrográfica do Cávado - Decreto Regulamentar N°17/2002)



Fontes: IGEO e Informação fornecida pela AMVC

Projeção Cartográfica: Datum 73, Hayford Gauss, IPCC

Figura 59 - Localização da Bacia a nível Nacional (Brito, et al 2008)

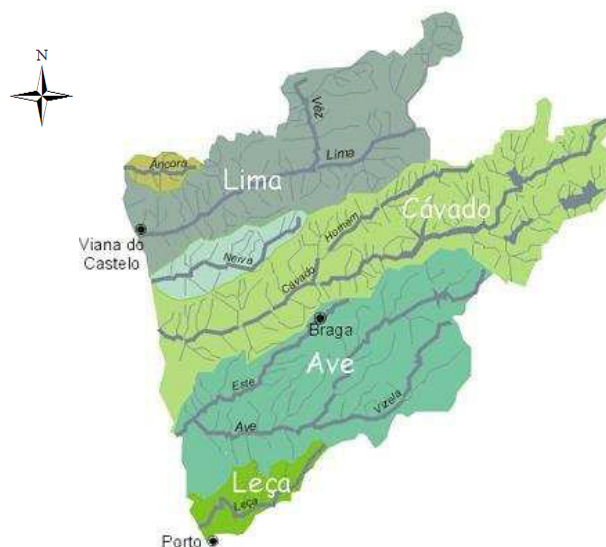


Figura 60 - Localização da Bacia a Nível Regional (adaptado de atlas do ambiente, edp dezembro 2008)

A Bacia Hidrográfica do rio Cávado inclui na sua totalidade o concelho de Amares e intersecta outros treze concelhos, dos quais Barcelos, Boticas, Braga, Cabeceiras de Basto, Esposende, Montalegre, Ponte de Lima, Ponte da Barca, Póvoa de Lanhoso, Póvoa de Varzim, Terras de Bouro, Vieira do Minho e Vila Verde (figura 61). Todos estes concelhos estão na zona de jurisdição da Comissão de Coordenação da Região Norte (CCDRN) (Plano da Bacia Hidrográfica do Cávado - Decreto Regulamentar n.º 17/2002)

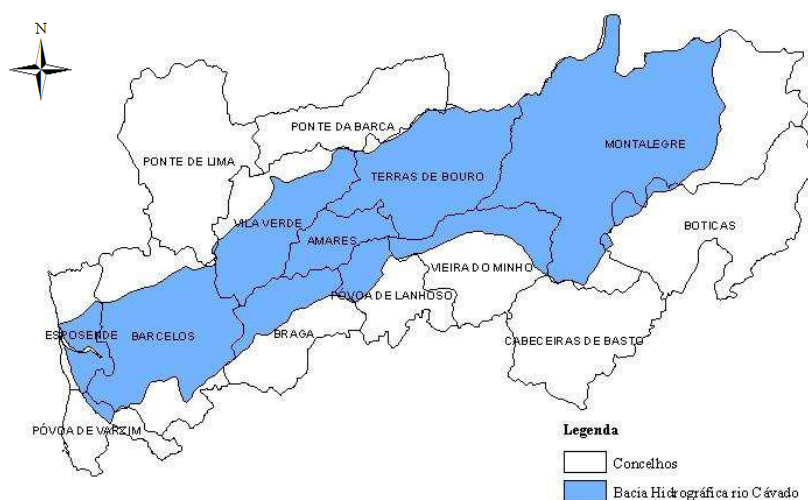


Figura 61 - Concelhos abrangidos pela Bacia Hidrográfica do Cávado (adaptado de atlas do ambiente, edp dezembro 2008)

4.2 GEOMORFOLOGIA

Numa observação geomorfológica verifica-se que a altitude da área incluída pelo plano de bacia hidrográfica varia entre o nível do mar e os 1 545 metros, sendo a altitude média de 542

metros, observando-se um aumento gradual da altitude do litoral para o interior da bacia (figura 62).

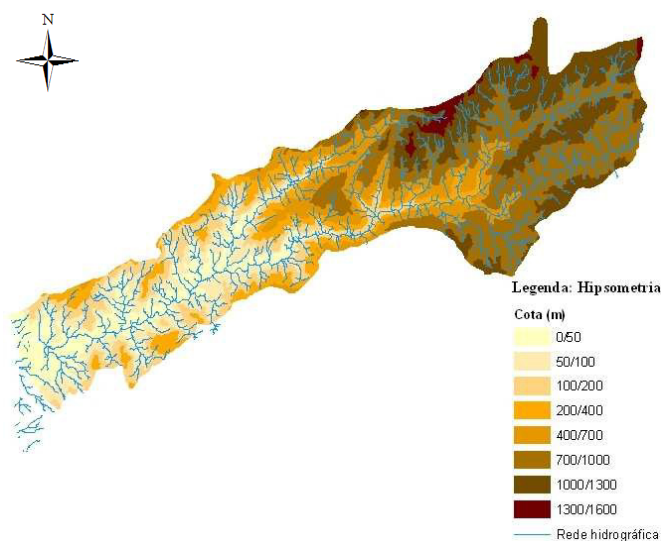


Figura 62 - Altitudes na Bacia Hidrográfica do Cávado (adaptado de atlas do ambiente, edp dezembro 2008)

Cerca de 47% da área da bacia hidrográfica encontra-se a altitudes superiores a 600 metros (Terras do Bouro, Vieira do Minho, Póvoa de Lanhoso) e cerca de 14% a uma altitude superior a 1050 metros como é o caso da zona de Montalegre; as áreas com altitudes inferiores a 150 metros ocupam 31% da área total da região (Braga, Barcelos, Esposende, Vila Verde e Amares). Verifica-se que cerca de 69% da área do plano apresenta declives inferiores a 15%, registando-se declives superiores a 25% em 10% da área, localizados sobretudo nas regiões centrais da bacia, correspondentes aos vales dos troços intermédios dos rios Cávado e Homem.

4.3 HIDROLOGIA

O Cávado tem a sua origem na serra do Larouco a cerca de 1520 metros, com um percurso de aproximadamente 129 km na direção Nordeste – Sudoeste até à foz em Esposende. Da sua rede hidrográfica há a destacar dois afluentes: na margem direita, o rio Homem, com um comprimento de 45 km, que nasce na Serra do Gerês e drena uma área de 256 km², na margem esquerda, o rio Rabagão, com um comprimento de 37 km, que nasce entre as Serras do Barroso e Larouco e drena uma área de 248 km² (figura 63).

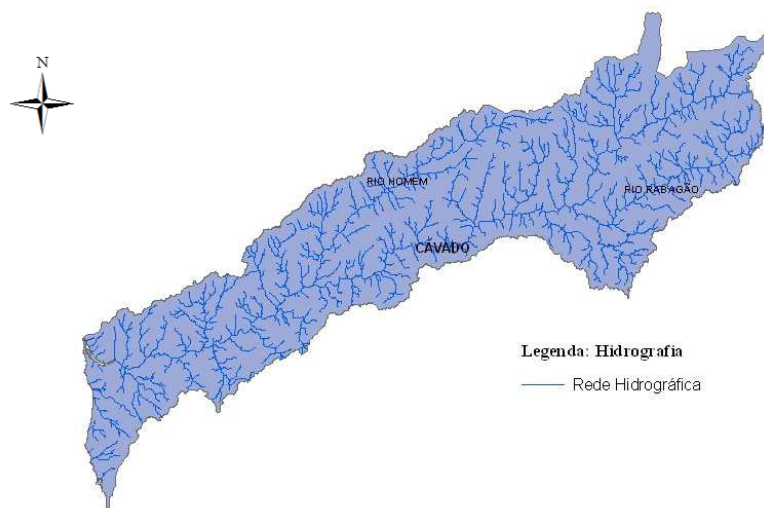


Figura 63 - Rede Hidrográfica da Bacia Hidrográfica do Cávado (adaptado de atlas do ambiente, edp dezembro 2008)

O rio Cávado possui vários afluentes: Ribeiro Caveiro, Ribeiro Milhazes, Rio Pontes, Rio Covo, Ribeira de Febros, Ribeira Tojal, Rio Homem, Rio Caldo, Rio Toco, Rio Cabril, Rio Cabreira, Rio Cavadas, Rio Beredo, Rio Borralha, Rio Rabagão

Nesta região existe uma importante disponibilidade hídrica, associada ao seu alto nível de pluviosidade, potenciado pela existência de significativa capacidade de regularização de aflúências (albufeiras do Alto Rabagão e de Venda Nova), e a possibilidade de tirar partido de um desnível de cerca de mais de 700m. O Sistema Hidráulico Cávado - Rabagão - Homem é constituído pelas seguintes seis Barragens: Alto Rabagão (o qual beneficia de uma derivação de aflúências feita a partir do rio Cávado, da barragem do Alto Cávado), Alto Cávado, Paradela, Venda Nova, Salamonde, Caniçada e Vilarinho das Furnas (figura 64). No trecho inferior do rio Cávado merece ainda referência a barragem de Penide (concelho de Barcelos) de menor dimensão e com características muito diferentes das restantes. Este conjunto de albufeiras tem uma elevada capacidade de armazenamento, aproximadamente 1093 hm³, dos quais 64% correspondem à albufeira do Alto Rabagão. A queda bruta total, entre o nível de retenção da albufeira do Alto Rabagão e a restituição do circuito hidráulico de Caniçada, é de cerca de 840 m, (figura 65) sendo da ordem dos 7 m a queda bruta aproveitada em Penide.

O escoamento total médio anual no território em questão segue um modelo de comportamento espacial semelhante ao modelo da precipitação, verificando-se os maiores valores nas regiões mais a montante da bacia (figura 66)

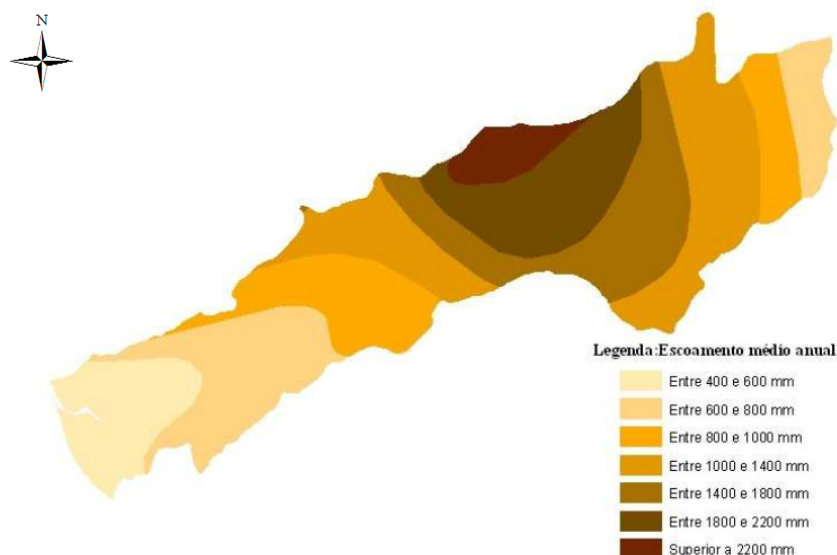


Figura 66 - Escoamento Médio Anual na Bacia Hidrográfica do Cávado (adaptado Atlas do ambiente, EDP 2008)

4.4.1 PRECIPITAÇÃO

Estes fatores determinam que a região seja a mais pluviosa de Portugal, onde, nos sectores montanhosos da bacia, ocorre precipitação anual superior a 3 500 mm. Uma parte significativa da bacia (correspondente aos sectores de jusante e intermédio e às áreas expostas a barlavento do sector de montante) insere-se numa vasta região de clima de tipo marítimo, fachada atlântica.

Este território apresenta valores de precipitação média anual que variam entre 900 e 4200 mm. Observa-se uma tendência para a precipitação diminuir progressivamente de montante para jusante, observando-se valores inferiores a 1500 mm anuais no litoral. (figura 67). Da mesma forma as áreas de maior relevo apresentam uma maior precipitação e maior humidade. (figura 68).

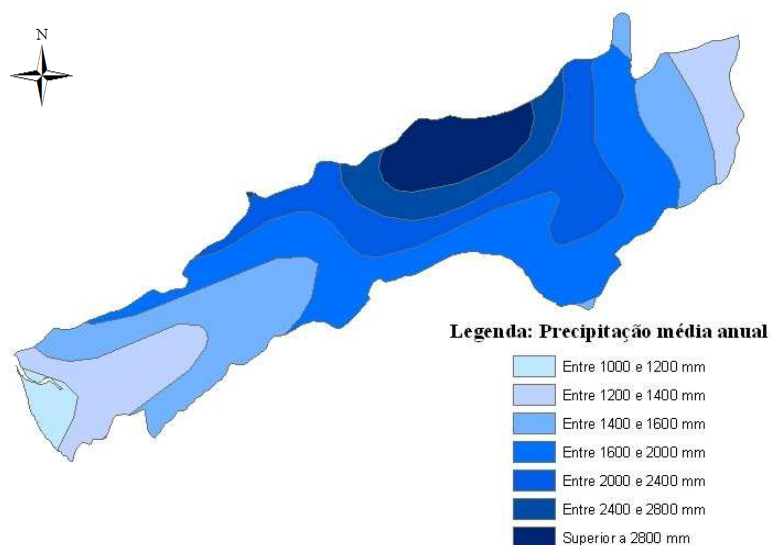


Figura 67 - Precipitação média anual na Bacia Hidrográfica do Cávado (adaptado de Atlas do Ambiente, EDP 2008)

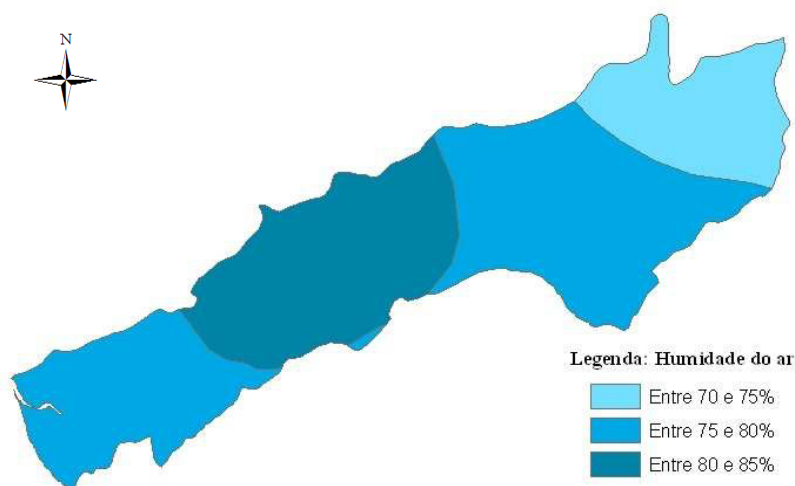


Figura 68 - Humidade do Ar na Bacia Hidrográfica do Cávado (adaptado de Atlas do Ambiente, EDP 2008)

4.5 OCUPAÇÃO DO SOLO

A região da bacia hidrográfica do Cávado é predominantemente ocupada por zonas florestais, abrangendo uma área de 61% do território, sendo que as grandes manchas deste tipo de solos se localizam na zona central da bacia e nos concelhos de Montalegre e Terras do Bouro. (figura 69)

A superfície ocupada por zonas agrícolas representa 32% da superfície da bacia, apresentando a sua maior incidência, nas margens e proximidades do rio Cávado, e nas áreas mais próximas do litoral.

Os territórios artificializados ocupam apenas 3% do território, concentrando-se mais próximo do litoral, como é o caso dos concelhos de Esposende, Barcelos e Braga, com um aumento

significativo de áreas urbanas. Encontram-se por vezes pequenas manchas deste tipo no território mais interior, como é o caso de Montalegre, Vieira do Minho e Terras do Bouro.

No restante território, evidencia-se o surgimento de inúmeros pequenos espaços urbanos correspondentes a núcleos populacionais pouco expressivos. Estas transformações são efetuadas, essencialmente, pela ocupação de solo agrícola.

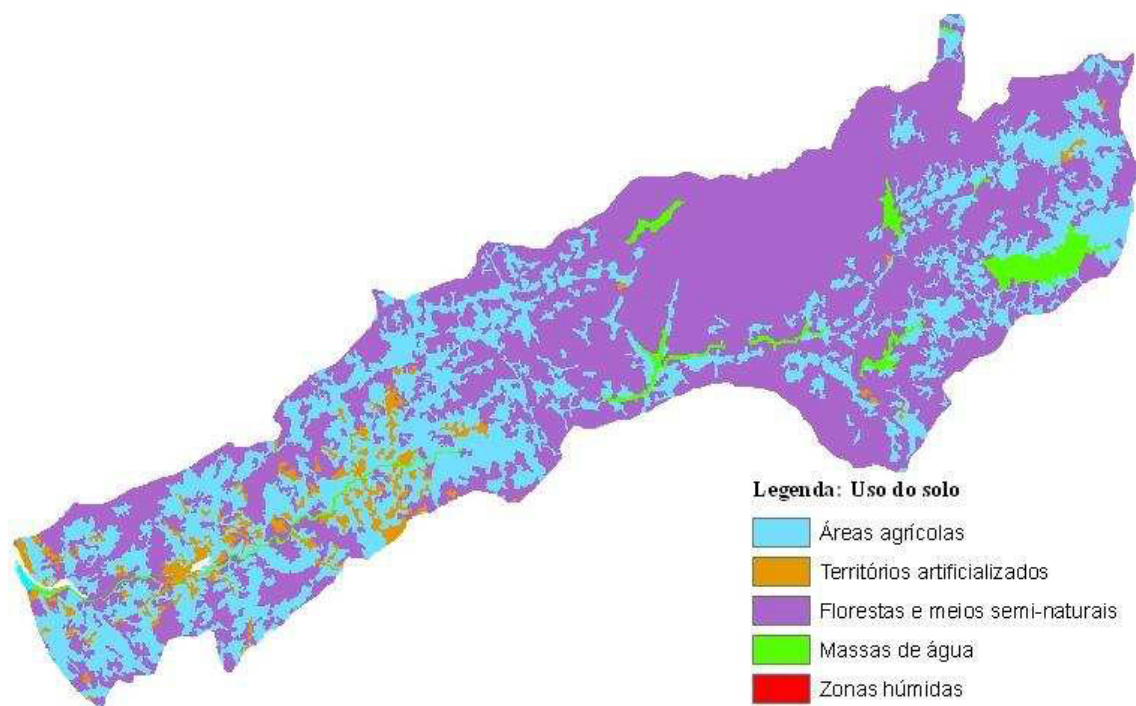


Figura 69 - Uso do solo na Bacia Hidrográfica do Cávado (existente em 2000) (adapt. de CORINE-Land Cover 2000, EDP 2008)

4.6 CARACTERIZAÇÃO SOCIOECONÓMICA

4.6.1 DEMOGRAFIA

A população residente na bacia hidrográfica do Cávado era de 445 052 habitantes, segundo dados do INE em fevereiro de 2014. De acordo com dados disponíveis, a população residente era em 2006 de cerca de 410 000 habitantes, verificando-se um aumento da população. É ainda possível verificar que os concelhos mais populosos estão mais próximos do litoral (Braga, Barcelos, Esposende) (figura 70) verificando-se que são também os mais densamente povoados. (figura 71)

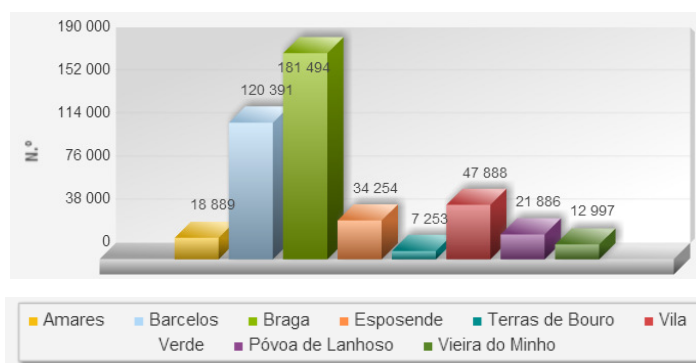


Figura 70 - População residente bacia hidrográfica Cávado (ano de ref: fevereiro 214) (fonte: INE)



Figura 71 - Densidade Populacional Bacia Hidrográfica Cávado (ano de ref: fevereiro 2014) (fonte: INE)

4.6.2 IDADE DA POPULAÇÃO

A idade da população tem também uma relevância preponderante, pois este fator está diretamente relacionado com a noção subjetiva do risco que a população tem em relação à possibilidade de ocorrência do evento adverso e a possibilidade de autossalvamento. Um dos grupos de risco será a população mais jovem que terá menor noção do risco e menor noção de autossalvamento, estando no grupo de Indivíduos Especialmente em Risco (IER). Em análise à figura 72 verifica-se que esta será uma problemática especialmente para os concelhos de Braga, Barcelos e Vila Verde.

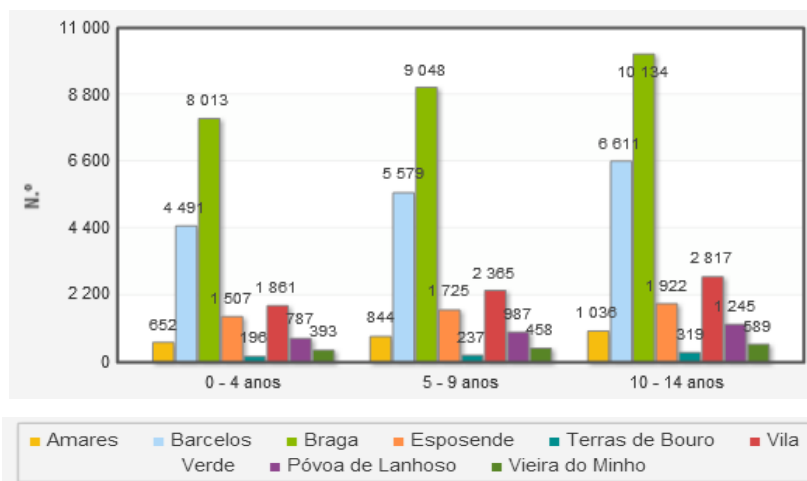


Figura 72 - Crianças Residentes por concelho (ano de ref: fevereiro 2015) (fonte: INE)

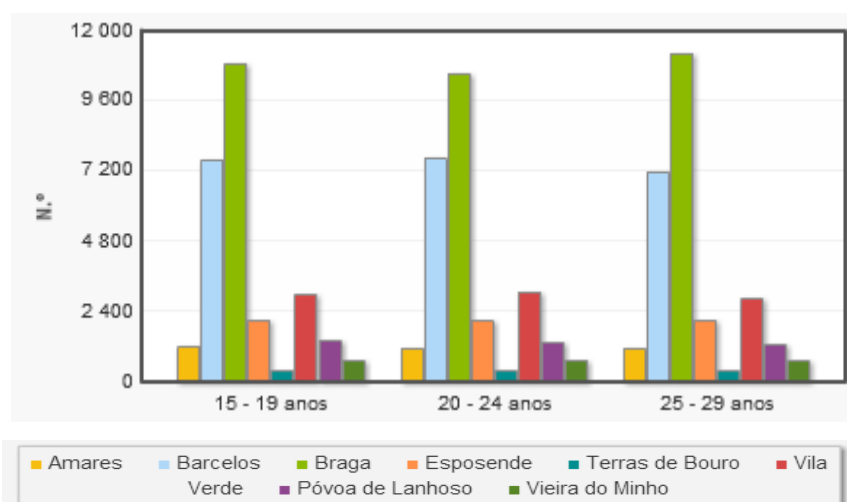


Figura 73 - População jovem residente por concelho (ano de ref: fevereiro 2015) (fonte: INE)

A população jovem poderá ter maior noção de risco, por terem maior mobilidade, têm maior possibilidade de autossalvamento, e a possibilidade de salvarem os IER. Em análise à figura 73 verificamos que maior massa de jovens se encontra nos concelhos de Braga, Barcelos e Vila Verde, precisamente onde anteriormente se verificou a maior massa de IER.

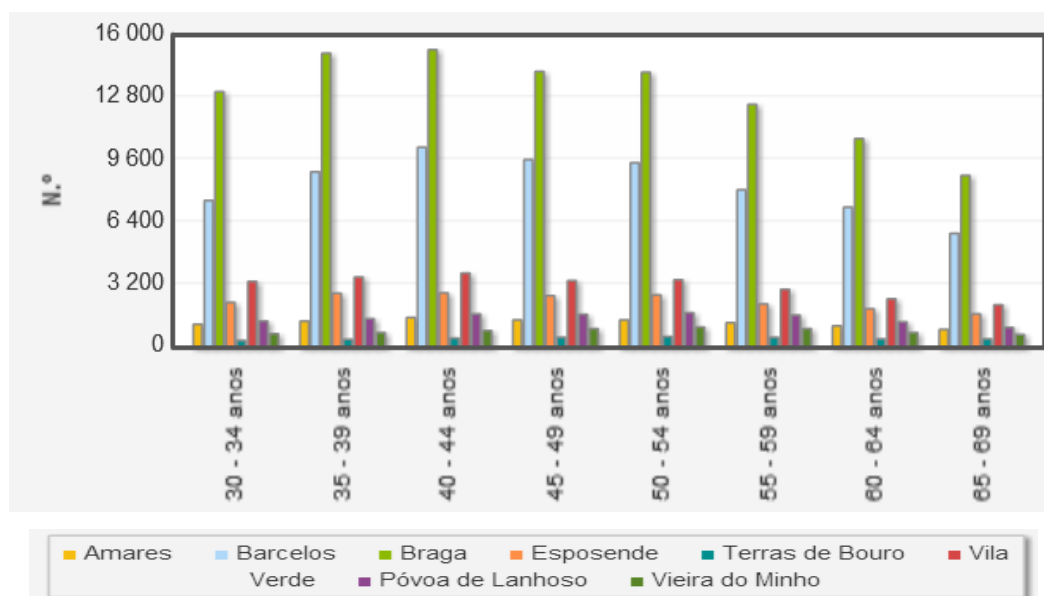


Figura 74 - População Ativa residente por concelho (ano de ref: fevereiro 2015) (fonte: INE)

A população ativa será a que tem maior noção do risco e maior possibilidade de autossalvamento juntamente com a população jovem. Em análise á figura 74 verifica-se que a população ativa é maior nos concelhos de Braga, Barcelos e Vila Verde.

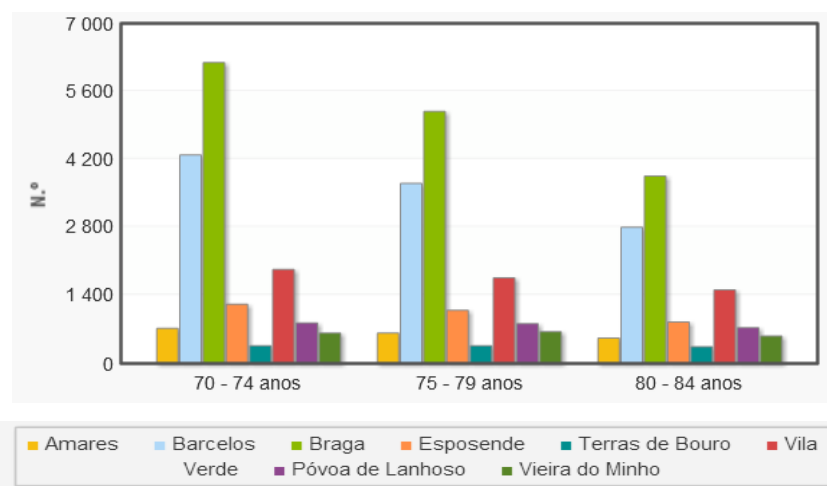


Figura 75 - População idosa residente por concelho (ano de ref: fevereiro 2015) (fonte: INE)

A população idosa será outro dos grupos de IER, em análise á figura 75 verificamos que novamente os concelhos de Braga, Barcelos e Esposende apresentam o maior número de população idosa.

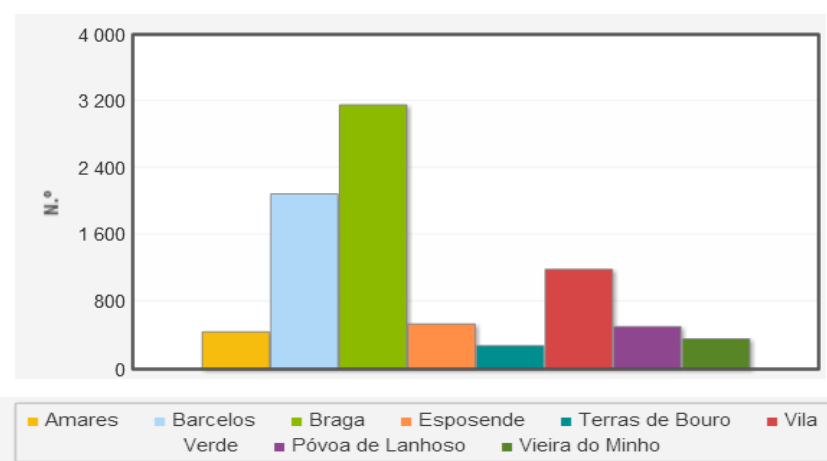


Figura 76 - População de idade avançada residente por concelho (ano de ref: fevereiro 2015) (fonte: INE)

A população de idade avançada (com mais de 85 anos) pertencerá também ao grupo de IER, que como era de esperar se verifica maior número nos concelhos de Braga, Barcelos e Vila Verde (figura 76), os concelhos mais populosos da região.

Em resumo observa-se que o maior número de Indivíduos Especialmente em Risco se encontra nos concelhos que simultaneamente possuem o maior número de jovens e população ativa.



Figura 77 - Índice de Dependência de Idosos (ano de ref: fevereiro 2015) (fonte: INE)

O índice de dependência de idosos traduz-se na relação entre a população idosa e a população em idade ativa, definida habitualmente como o quociente entre o número de pessoas com 65 ou mais anos e o número de pessoas com idades compreendidas entre os 15 e os 64 anos, pelo que se verifica na figura 77, que a maior dependência de idosos acontece nos concelhos imediatamente a jusante da barragem nomeadamente Terras de Bouro, Vieira do Minho, Vila Verde e Póvoa de Lanhoso.



Figura 78 - Índice de dependência de Jovens (ano de ref: fevereiro 2015) (fonte: INE)

O índice de dependência de jovens (figura 78) traduz-se na relação entre a população jovem e a população em idade ativa, definida habitualmente como o quociente entre o número de pessoas com idades compreendidas entre os 0 e os 14 anos e o número de pessoas com idades compreendidas entre os 15 e os 64 anos. Deste modo verifica-se uma dependência de jovens, é maior no concelho de Vila Verde, Esposende e Braga.

De salientar que o concelho de Vila Verde apresenta o maior índice de dependência de jovens e o maior índice de dependência de idosos, traduzindo-se numa problemática de salvamento da população em caso de evento adverso.

4.6.3 ESCOLARIDADE DA POPULAÇÃO

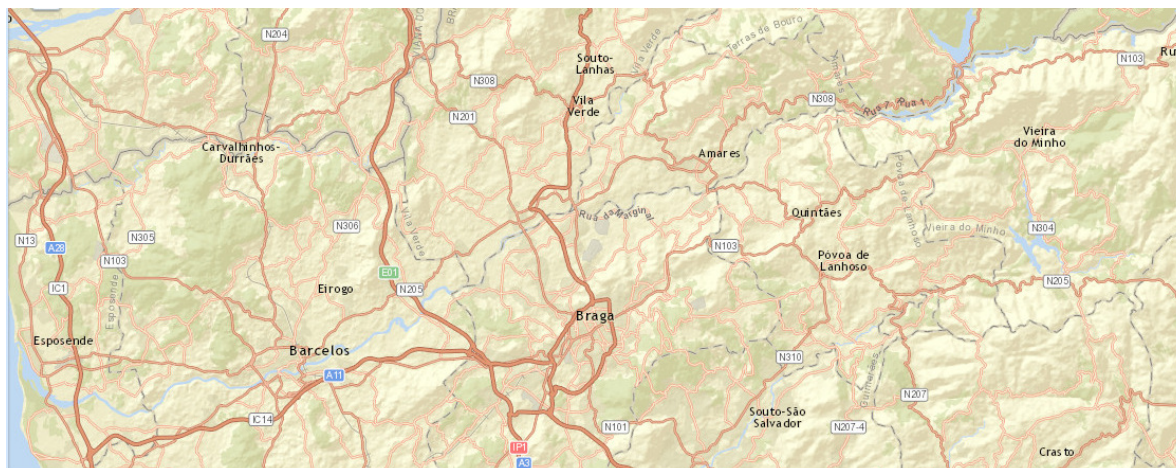
A escolaridade da população, assim como a idade da população, está relacionada com a perceção que a população tem em relação à ocorrência de um evento adverso. Verifica-se que os concelhos do interior (Terras de Bouro, Vieira do Minho, Póvoa de Lanhoso), onde se observa a população mais idosa, são também aqueles onde se encontra a população com maior taxa de analfabetismo. (figura 79)



Figura 79 - Taxa de analfabetismo Bacia hidrográfica Cávado (ano de ref: fevereiro 2014) (fonte: INE)

4.6.4 ACESSIBILIDADES

Todos os concelhos são servidos por rede viária interna, com Estradas Nacionais e caminhos municipais. A ligação entre os vários concelhos do interior é efetuada apenas por estradas nacionais, sendo que apenas nos concelhos do litoral é possível uma ligação viária através de autoestradas como é o caso da A11. (figura 80)



Apenas dois concelhos são servidos por rede ferroviária (Braga e Barcelos) (figura 81). Pode-se afirmar que os concelhos mais populosos e mais jovens são simultaneamente os melhores servidos em questões de acessibilidades, sendo servidos por mais do que um tipo de meio de transporte



Figura 81 - Mapa Ferroviário da Bacia Hidrográfica do Cávado (fonte: Infraestruturas de Portugal, 2015)

4.6.5 PATRIMÓNIO RELEVANTE

4.6.5.1 FAUNA E FLORA

A fauna da área em estudo é constituída por mamíferos, aves, répteis e anfíbios, com pequenos habitats de nidificação, criação e refúgio. Não são conhecidas nas zonas a intervir populações importantes destes grupos faunísticos, no entanto há registos da presença de espécies ameaçadas. (APA 2011). Para os recursos faunísticos, é de destacar a presença de espécies de mamíferos protegidos, nomeadamente a toupeira-de-água (PBHC 2002)

No estuário do Cávado não é notório a passagem ou nidificação de aves aquáticas migratórias. No entanto, podem encontrar-se nesta região algumas espécies de aves com especial significado em termos de conservação da natureza (PBHC 2002)

4.6.5.2 PAISAGEM

Poderá considerar-se que a área de estudo apresenta predominantemente uma paisagem de média a elevada qualidade visual. (PBHC 2002)

As margens do rio Cávado apresentam em locais pontuais, nomeadamente zonas agrícolas, alguma vegetação “descontrolada”

4.7 DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo desta dissertação está compreendida entre a barragem da Caniçada (cota 163m) e a foz do rio Cávado em Esposende (cota 0.00), num percurso com cerca de 100km. Trata-se da



região da bacia hidrográfica do Cávado mais populosa, onde os núcleos urbanos têm maior significado, e onde o cenário de uma eventual rutura de barragens seria mais catastrófico.

No percurso em estudo temos 2 barragens com início na Barragem de Caniçada no concelho de Terras do Bouro e Vieira do Minho e uma barragem de menor dimensão no concelho de Barcelos, a barragem de Penide, e inúmeros açudes.

A barragem em estudo (tabela 7) é uma barragem de betão em arco, com uma altura acima da fundação de 76m e um desenvolvimento do coroamento de 246m. Relativamente às características da albufeira (tabela 8) é uma albufeira com capacidade de 159300dm³ com uma superfície inundável de 689 ha. A área total da bacia hidrográfica é de 774.66km² sendo a sua própria bacia de 159.61km²

Características da Barragem	
Tipo de Barragem	Betão em arco
Desenvolvimento do coroamento	246m
cota do coroamento	163
altura acima da fundação	76m
capacidade do descarregador	1700m ³ /s
capacidade descarregador de fundo	142m ³ /s

Tabela 7 - Características da Barragem da Caniçada

Características da Albufeira	
Capacidade Total	159300*10m ³
Capacidade Útil	147900*10m ³
Volume morto	11400*10m ³
Cota Nível Pleno Armazenamento (NPA)	162m
Cota de máxima cheia	163m
Cota nível mínimo exploração (NME)	118m
Área inundada ao NPA	689ha

Tabela 8 - Características da albufeira da Caniçada



CAPITULO 5 – DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

5.1 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO MODELO UTILIZADO

Para uma simulação rigorosa dos processos é essencial utilizar uma formulação matemática adequada à simulação do fenómeno de propagação das ondas de cheia.

Um escoamento num rio, escoamento em canal aberto, não é mais que um escoamento com superfície livre em contacto com a atmosfera. Este tipo de escoamento é originado por ação da força gravítica, sendo o gradiente de pressão na interface com a atmosfera desprezável. O balanço de forças básico num canal aberto ocorre entre as forças gravítica e de atrito.

Embora no caso da rotura de barragens as acelerações verticais possam desempenhar um papel importante no escoamento (sobretudo no trecho inicial) opta-se por desprezar essas acelerações. Assim, os resultados deverão ser encarados com alguma prudência, sobretudo no que se refere ao trecho mais próximo da barragem.

5.1.1 APROXIMAÇÃO AO ESCOAMENTO UNIDIMENSIONAL

Uma abordagem mais prática da engenharia é a aproximação ao escoamento unidimensional (figura 82), dado que a massa específica do líquido é aproximadamente constante, a equação da continuidade para escoamento permanente reduz-se à vazão volumétrica Q constante ao longo do canal

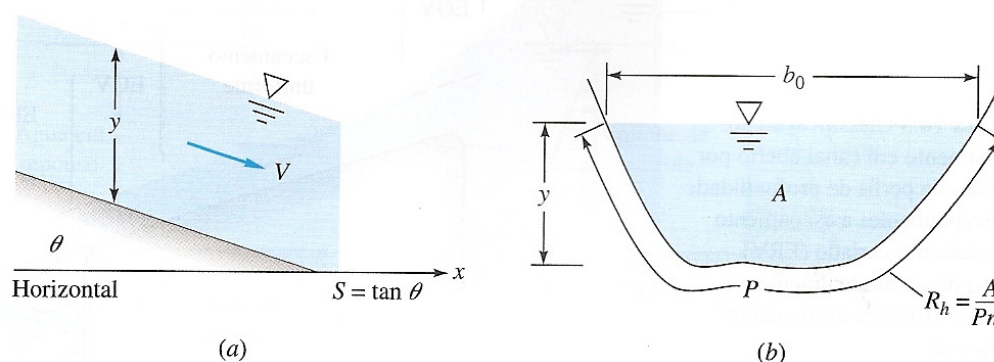


Figura 82 - Geometria e notação para escoamento em canal aberto

a) Perfil Longitudinal b) secção transversal – todos estes parâmetros são constantes no escoamento uniforme (White, 2011)

Uma segunda relação unidimensional entre a velocidade e a geometria do canal é a equação da energia incluindo perdas por atrito.

Os sistemas simulados neste estudo são denominados de sistemas unidimensionais, por apenas se considerar as variações de velocidade no sentido do escoamento, menosprezando a distribuição da velocidade nas restantes direções. A formulação matemática de escoamentos unidimensionais em



superfície livre baseia-se nas equações da energia, da conservação da quantidade de movimento e da continuidade. As equações da continuidade e da quantidade de movimento são geralmente designadas por equações de Saint-Venant.

As equações de continuidade e de conservação da quantidade de movimento (Saint – Venant), apresentam a seguinte forma:

$$\frac{\partial A_f}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{lat} \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A_f} \right) + g A_f \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{g Q |Q|}{C^2 R A_f} - W_f \frac{\tau_{wi}}{\rho_w} = 0 \quad (2)$$

em que,

Q =caudal

t =tempo

x =coordenada unidimensional

A_f =é a área da secção molhada

g =aceleração da gravidade

h =altura do escoamento

C =coeficiente de Chézy

R =raio hidráulico

W_f = largura superficial

q_{lat} =caudal lateral unitário

τ_{wi} =tensão tangencial devida ao vento

ρ_w =massa volúmica da água

5.2 SOFTWARE DE MODELAÇÃO HIDRODINÂMICA E HIDROLÓGICA

O software utilizado neste estudo foi o SOBEK, uma tecnologia apresentada pela Deltares, desenvolvido em conjunto por institutos públicos holandeses e organizações governamentais, institutos de pesquisa, universidades e consultores privados em todo o mundo.

O software SOBEK oferece um ambiente para a simulação de todos os problemas de gestão nas áreas de sistemas fluviais e estuários, sistemas de irrigação, drenagem de águas residuais e sistemas de águas pluviais, controlo em tempo real, qualidade da água. Isto permite combinações de fluxo em condutas fechadas, canais abertos, os fluxos de rios, bem como uma variedade de processos hidráulicos, hidrológicos e ambientais. Possibilita a utilização de vários módulos do programa em simultâneo, fornecendo desta forma soluções para simulações de sistemas mais complexos.



Este simulador efetua modelação unidimensional utilizando a versão SOBEK-Rural, SOBEK-Urban e SOBEK-River, a modelação em 2D está disponível na versão SOBEK Overland Flow. A modelação em 3D também é possível recorrendo ao DELFT3D.

O escoamento unidimensional é delineado com recurso às equações de continuidade e de conservação da quantidade de movimento. Conjuntamente com estas equações são ainda empregues outras expressões para o cálculo das características do escoamento em estruturas como: passagens hidráulicas, pontes, sifões invertidos, orifícios, bombas, sifões e descarregadores. O escoamento nestas condições está intimamente ligado aos níveis a montante e a jusante da estrutura, das características geométricas e de determinadas propriedades específicas de cada uma delas.

A utilização da ferramenta SOBEK mostra-se bastante acessível e clara, sendo necessário apenas o conhecimento de algumas regras para o seu funcionamento.

5.3 HIDROGRAMA DE RUTURA

De acordo com o Boletim 111 do Comitê Internacional de Grandes Barragens (ICOLD, 1998), uma metodologia de análise de rutura de barragem pode ser descrita em quatro passos, (figura 83). O presente estudo não irá abordar a avaliação ou elaboração de planos de emergência.

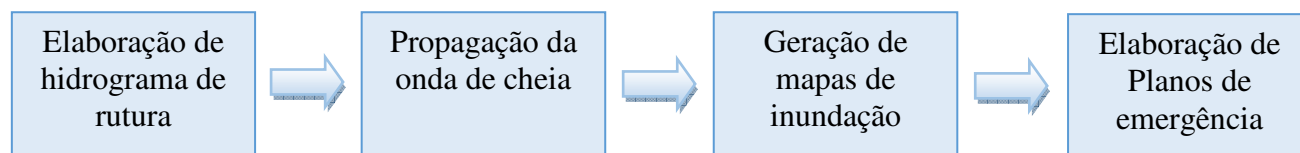


Figura 83 - Metodologia de análise de rutura de barragem

Para simular o evento de rutura de barragem, inicialmente é necessário elaborar o hidrograma da vazão defluente no momento da rutura. As características principais a serem definidas referem-se à forma da brecha e ao tempo de formação da mesma. Para uma barragem de betão utiliza-se com frequência o termo rutura instantânea, com o tamanho potencial da brecha variando rapidamente, para uma barragem de betão em arco, poder-se-á assumir o tempo da formação total da brecha da ordem de 10 minutos (Macdonald e Langridge-Monopolis 1984). O Departamento de Ecologia do Estado de Washington (Department of Ecology, 1995) recomenda 0 a 6min. No Reino Unido, assume-se, para este tipo de barragem, a ocorrência de rutura instantânea, considerando um período de até 0,5 minuto (Doe, 1991 apud Morris e Galland, 2000) (tabela 9).

Um parâmetro de elevado interesse para a elaboração do hidrograma de rutura é a largura da brecha, sendo difícil a determinação deste parâmetro.



Tipo de Barragem	Largura Final da Rutura	Tempo de rutura (h)
Arco de betão	$0,8B_d < B_d < 1,0B_d$	Instantâneo
Multiplo arco ou contrafortes	$0,6B_d < B_d < 0,8B_d$	Instantâneo
Arco Gravidade	$0,5B_d < B_d < 0,8B_d$	Instantâneo
Gravidade	$B_d < B_d < 0,8B_d$	0,2

sendo:

B_b – comprimento médio da brecha [m]

B_d – comprimento da crista da barragem ao longo do vale [m]

O termo ruptura instantânea pode ser compreendido como uma ruptura rápida, considerando um período de até 30 segundos.

Tabela 9 - Determinação da largura da brecha e tempo de rutura
(fonte: DOE, 1991 apud MORRIS e GALLAND, 2000)

Outro dos parâmetros importantes para a elaboração do hidrograma de rutura é a determinação da vazão devido à rutura. Diversos autores apresentam expressões matemáticas relacionando a máxima vazão de descarga com as características da barragem.

Fread em 1981 reconhece que a simulação de cheia induzida devido à rutura de barragens está sujeito a inúmeras fontes de incerteza, e que mesmo a tentativa de reproduzir eventos observados, para os quais é conhecida a evolução temporal da brecha apresenta erros significativos.

Os resultados obtidos estão intimamente ligados á hipótese e considerações admitidas pelo operador, desta forma, é pertinente testar a sensibilidade das fórmulas apresentadas pelos diversos autores.

Autor	Máxima Vazão	Características
Fread (1981)	$Q_p = 3.1 WH_w^{1.5} \left[\frac{A}{A + \tau \sqrt{H_w}} \right]^3 \quad (3)$	equação empírica com base em inúmeras simulações com o modelo DAMBRK. É usado na NWS (National Weather Service)
Hagen (1982)	$Q_p = 1,205(H_d V)^{0.48} \quad (4)$	Baseada em observações de valores relativos a casos já ocorridos de ruturas
Freanch (1985)	$Q_p = 1,7 B_s \left\{ \frac{1,94 \frac{A_s}{B_s}}{T_s + \left[\frac{1,94 A_s}{(B_s \sqrt{H_d})} \right]} \right\} \quad (5)$	Considera a formulação da brecha retangular, desenvolvendo-se nem intervalo de tempo (t)
Bureau (1987)	$Q_p = 19 H_d^{1.85} \quad (6)$	Baseada em dados recolhidos de vazões de pico históricas e da profundidade da lâmina d'água no reservatório no momento da rutura
Froehlich (1987)	$Q_p = 40.1 V_w^{0.295} H_w^{1.24} \quad (2)$	Resulta do erro mais improvável do rompimento de barragem
Mascarenhas (1991)	$Q_p = 7,683 H_d^{1.909} \quad (7)$	Baseada na análise de 19 casos diferentes de ruturas de natureza diversas



Molinário (1991)	$Q_p = 0.116(V/H)^{0.221} g^{0.5} H^{2.5} \quad (8)$	
Singh (1996)	$Q_p = 1.7 B_b H_b^{3/2} \quad (9)$	Segundo Singh, o escoamento que passa pela brecha pode ser assumido como análogo ao escoamento que passa por um vertedor rectangular de soleira espessa
U.S. Army Corps of Engineers (1997)	$Q_p = \frac{8}{27} B \sqrt{g Y_{medio}^3} \quad (10)$	Desenvolvida por Saint-Venant para o caso de remição instantânea e total da barragem
ICOLD (1998)	$Q_p = \frac{8}{27} \left(\frac{B_b}{B_s} \right)^{1/2} B_s \sqrt{g Y_{medio}^3} \quad (11)$	Considera que a rutura ocorre em parte da crista de uma barragem

nas quais: Q_p é a descarga máxima defluente da barragem em ruptura [m^3/s]; V é o volume do reservatório para o NA máximo [m^3]; A_s é a área do reservatório para o NA máximo [m^2]; B_b é a largura da barragem [m]; H_b é a altura da barragem [m]; B_b é a largura final da brecha [m]; H_b é a altura final da brecha [m]; Y_{medio} é a profundidade média no reservatório no instante da ruptura [m]; e T_p é o tempo para desenvolvimento da brecha [s].

w	largura brecha
Hw	altura da água
τ	Tempo decorrido para formar a brecha
A	$23.4 * Sa/w$
Sa	superfície do reservatório para profundidade Hw

Tabela 10 - Formulas testadas para o modelo hidrológico

5.4 CONSTRUÇÃO DO MODELO

No presente trabalho o modelo hidrológico e hidrodinâmico utilizado foi desenvolvido pelo Grupo de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade do Minho. O modelo existente foi criado com o software Sobek para um estudo hidrodinâmico e de qualidade da água do rio Cávado. A versão utilizada neste trabalho, inclui, para além do trecho do rio Cávado entre a barragem da Caniçada e Esposende, a norte o rio Homem e a sul o rio Caveiro. Para além da Barragem da Caniçada, inclui ainda os aproveitamentos hidroelétricos da Ponte do Bico, Ruães, e Penide (figura 84).

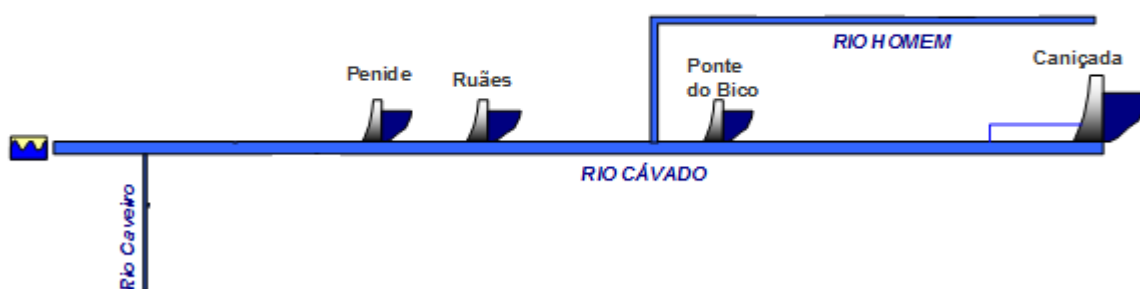


Figura 84 -Esquema conceptual do modelo (adaptado de Pinho,2013)

Inicialmente um modelo unidimensional consiste na criação de uma rede unidimensional formada por trechos e nós que deverão ser numerados de forma adequada. No caso do software Sobek, estas tarefas são executadas internamente pelo programa. A rede unidimensional deverá coincidir, em geral, com o alinhamento principal do rio. No caso de um trecho fluvial, este alinhamento poderá coincidir com o talvegue ou com uma linha equidistante das margens do rio (entendidas como as linhas que resultam da interceção da superfície livre com o terreno). Salienta-se que a linha assim definida é variável conforme se utilizem margens do leito menor ou do leito de cheia. Em cada caso deverá ser avaliada a posição de modo a que, em conjunto com as secções transversais, a geometria do canal fluvial seja aproximada com o maior rigor possível. A aquisição destas linhas pode ser realizada a partir de informação das linhas de água de cartas topográficas ou sistemas de informação geográfica (SIG), quando disponíveis. De forma geral, esta informação não se encontra disponível (ou quando disponível não apresenta resolução espacial adequada) pelo que há necessidade de digitalizar essa informação utilizando-se uma ferramenta de CAD, SIG ou através de aplicações idênticas ao Google Earth (Pinho, 2013).

Dado que o modelo existente foi elaborado para um estudo de cheia em condições de controlo pelas barragens de montante (figura 85), foi necessário editar o modelo existente e dotá-lo de informação necessária ao estudo de cheias induzidas por rutura da barragem da Caniçada (figura 86), através de cartografia vetorizada disponibilizada pelos vários municípios abrangidos neste estudo. Infelizmente não foi possível obter cartografia de todos os municípios sendo que para os municípios de Vieira do Minho e Póvoa de Lanhoso, foi necessário recorrer ao software Global Mapper. Este é uma aplicação SIG de fácil utilização, que oferece acesso a uma variedade inigualável de conjuntos de dados espaciais. Apresenta grande interface com o Google Earth, pois é capaz de ler a informação topográfica do Google Earth transformando-a em pontos cotados e curvas de nível, passíveis de serem exportados para software como o civil 3d. Desta forma terá de



se aceitar o erro proveniente na transformação do modelo do terreno google earth em desenho vetorizado através do Global Mapper.

Dado que possuímos grande parte da cartografia da zona em estudo em formato vetorial fornecida pelos municípios, foi testado o erro da utilização de software como o global mapper para a obtenção de cartografia vetorizada. Verificou-se que para um mesmo ponto se obtêm um erro de +/- 1m a 2,5m, considerando-se este um erro aceitável.

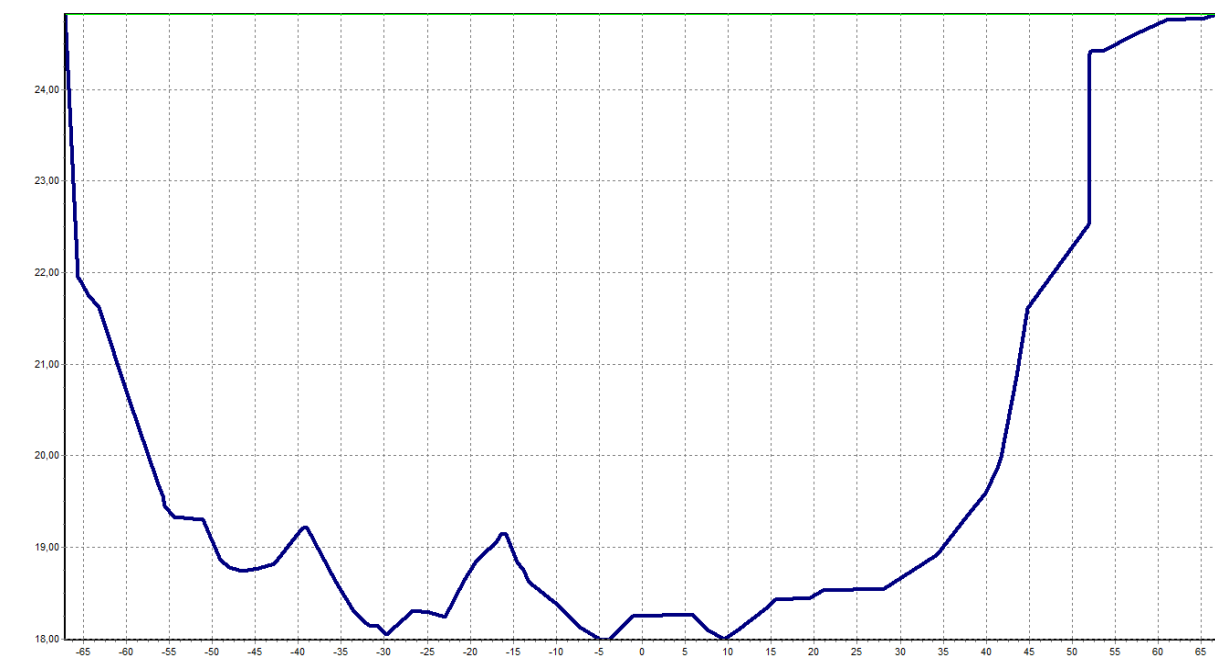


Figura 85 - Secção referente à confluência Rio Homem-Rio Cávado do modelo existente (eixo y- altitude (m) – eixo x distancia (m))

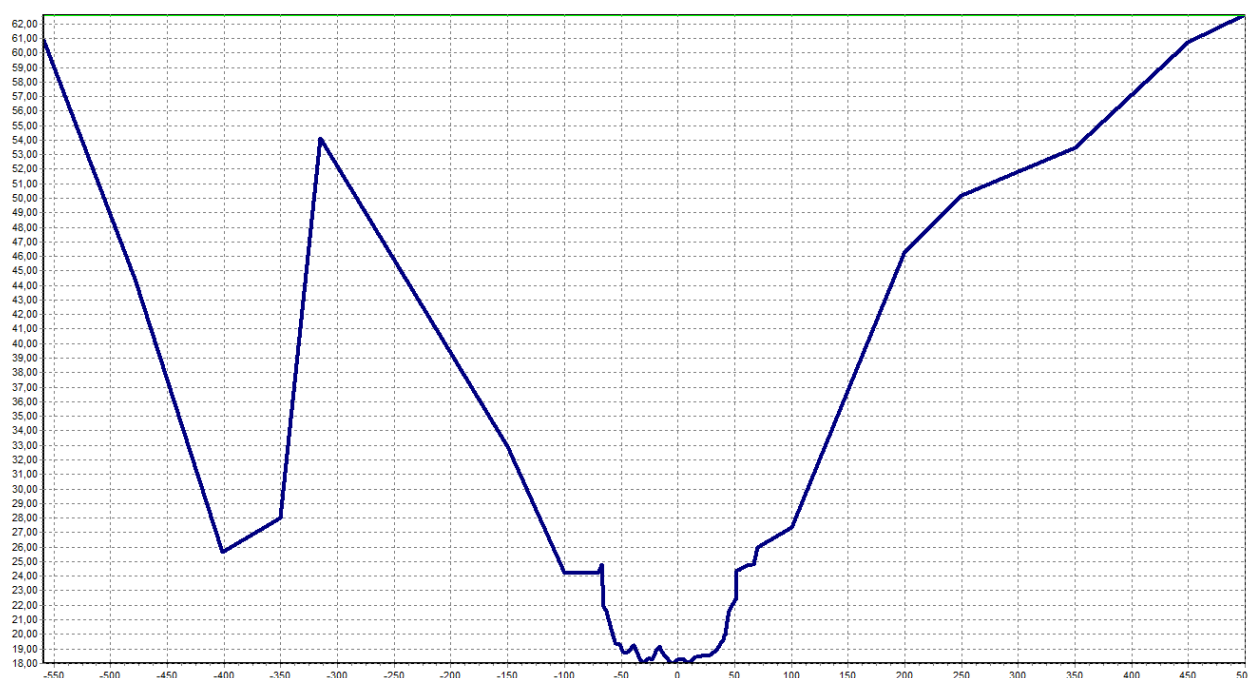


Figura 86 - Secção referente à confluência Rio Homem-Rio Cávado após alteração de secção (eixo y- altitude (m) – eixo x distancia (m))

Numa segunda fase da construção do modelo, foram definidas todas as secções transversais e respectivas cotas topográficas do talvegue, de modo a que a geometria do canal fosse representada de forma adequada. A principal dificuldade deste parâmetro prende-se sobretudo com a escassa informação batimétrica. Para se ultrapassar esta dificuldade, deve ser sempre recomendada a execução de levantamentos batimétricos nas situações em que os resultados do modelo servirão para sustentar decisões técnicas avalizadas (Pinho, 2013).

Existem situações em que a realização de levantamentos não é exequível ou não se justifica, nestes casos recorre-se a uma definição simplificada, sobretudo dos leitos menores dos canais fluviais. A estratégia mais comum consiste na adoção de uma forma simplificada para a geometria do leito menor (retangular ou trapezoidal), na identificação de estruturas hidráulicas em que é conhecida a cota do leito (açudes, barragens, etc) e na utilização de cartografia ou ortofotomapas que permitam definir a largura (ou largura maior, se for considerada a forma trapezoidal) do leito menor. Esta informação é complementada com informação topográfica dos leitos emersos e/ou da base de dados global da topografia terrestre. A partir desta informação podem ser obtidas secções transversais simplificadas (leito menor e leito de cheia) dos canais fluviais (figura 87) (Pinho, 2013).

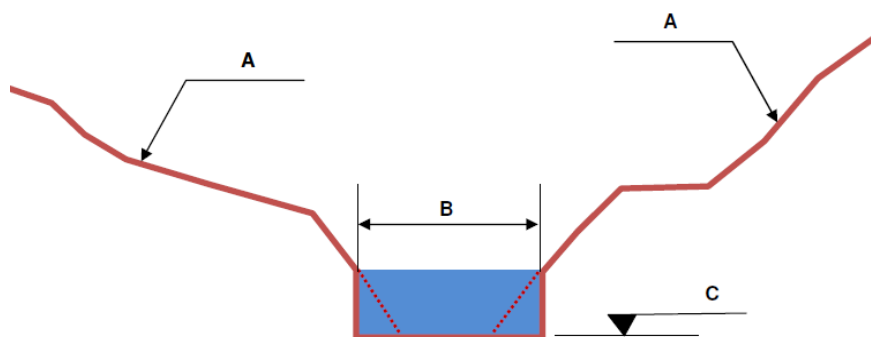


Figura 87 - Definição simplificada das secções transversais
A-Margens emersas; B-Largura do leito menor; C- Cota do Talvegue
(Pinho, 2003)

O modelo existente possui informação batimétrica efetuada em 2004, apesar de esta informação ter mais de 10 anos e ser já obsoleta, foi a única possível de ser obtida.

Na terceira fase do processo construtivo do modelo foram caracterizadas as suas condições de fronteira. Estas condições têm que ser definidas obrigatoriamente em todas as extremidades abertas da rede unidimensional. Decorrem da metodologia associada ao método numérico do programa utilizado, mas em geral, obrigam ao conhecimento da solução do problema naqueles pontos.

Deste modo, os modelos deverão ser prolongados para além da área de interesse para o estudo para que são criados, até locais em que seja conhecida, ou facilmente estimada, a solução do



problema, como é o caso de oceano, barragens, açudes e estações de monitorização. Nos modelos hidrodinâmicos de trechos fluviais é usual a adoção de condições de fronteira do tipo imposição de caudal (velocidade) a montante e nível da superfície livre na fronteira de jusante (Pinho, 2013).

Por último dever-se-á proceder à calibração e se possível validação, adotando valores dos parâmetros de calibração (rugosidades das paredes do canal fluvial, ou parâmetros relacionados e coeficiente de viscosidade turbulenta) que minimizem diferenças entre valores observados e valores simulados. Na validação devem ser utilizadas séries de medições distintas daquelas que são utilizadas na calibração. Na ausência de séries de dados (velocidades/caudais e níveis da superfície livre) que permitam a calibração e validação do modelo, devem ser adotados valores dos parâmetros de calibração idênticos aos utilizados em trabalhos semelhantes e realizar-se uma análise de sensibilidade dos resultados aos referidos valores. Assim, os resultados obtidos deverão ser interpretados em função da variabilidade obtida com a análise de sensibilidade (Pinho, 2013).

5.5 CENÁRIOS PROPOSTOS

Viseu e Martins (1997) defendem que para uma simulação de rutura de barragem devem ser apresentados pelo menos 3 cenários, sendo 2 deles de rutura hipotética da barragem e 1 de operação em condições extremas.

A possibilidade de uma barragem de betão em arco sofrer uma rutura é mínima, nesse sentido para este estudo admite-se por exemplo um cenário de guerra, como o sucedido da Alemanha durante a 2ª Guerra Mundial, em Mohne Eder, já que estruturas hidráulicas como barragens são sempre alvos frágeis. Salienta-se que em casos destes, nem mesmo o melhor plano de emergência é capaz de evitar esta catástrofe.

De seguida apresentam-se os 3 cenários estudados:

Para o cenário 1 optou-se por uma altura de água de 68m (cota 162), num cenário em que a barragem se encontra na sua capacidade máxima com uma superfície inundada de 689ha (tabela 11) e uma rutura total da barragem com uma extensão de 162m (figura 88). Tratando-se de uma barragem de betão em arco, onde a rutura se poderá considerar instantânea, adotou-se um tempo de rutura de 36 segundos (0.01 h)

Cenário 1	
Largura da Brecha	162m
Altura de água	68m
Tempo para formação da brecha	0.01h
Superfície inundável	6890000m ²

Tabela 11 - Características para o cenário 1

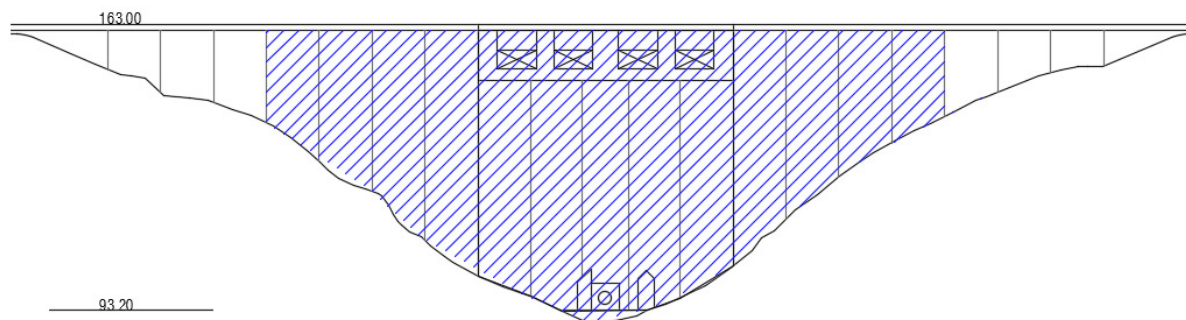


Figura 88 – Cenário 1 – largura da brecha de 162m

Para o cenário 2 admitiu-se uma altura de água de 68 m, ou seja, a barragem encontra-se na sua capacidade máxima á semelhança do cenário 1, considerou-se uma rutura parcial da barragem com uma extensão de 62m (figura 89), e um tempo de rutura de 0.01h. (tabela 12).

Cenário 2	
Largura da Brecha	62m
Altura de água	68m
Tempo para formação da brecha	0.01h
Superfície inundável	6890000m2

Tabela 12 - Características para o cenário 2

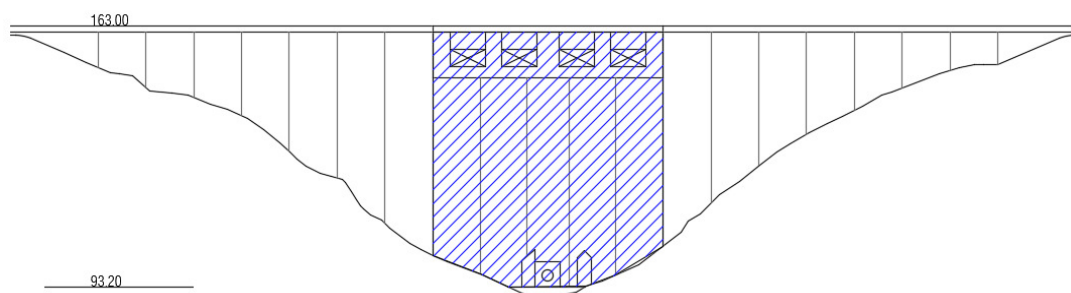


Figura 89 - cenário 2 - largura da brecha de 62m

Para o cenário 3 admitiu-se um funcionamento em condições extremas da barragem da Caniçada, ou seja, encontramos os descarregadores em funcionamento máximo, considerando-se igualmente uma altura de água de 68 m (cota 162), (tabela 13).

Cenário 3	
Barragem da Caniçada a funcionar em condições extremas	
Descarregadores de emergência	1700m3/s
Descarregador de fundo	142m3/s
Caudal turbinado	2*30m3/s

Tabela 13 - Características para cenário 3



CAPITULO 6 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

6.1 HIDROGRAMAS DE RUTURA

Para cada cenário de rutura ocorre uma cheia cujas características dependem das condições e parâmetros estabelecidos. O método mais simples para a obtenção do hidrograma de rutura é estimar caudais máximos e o tempo para o esvaziamento da albufeira.

Para a obtenção dos caudais máximos foram utilizadas as diversas expressões testadas pelos autores apresentados no capítulo anterior, obtendo-se os resultados da tabela 14.

	Cenário 1	Cenário 2
Autor	Caudal (m ³)	Caudal (m ³)
Fread (1981)	153182	47 079,08
Hagen (1982)	26161,03	26 161,00
Freanch (1985)	157847	60 410,00
Bureau (1987)	46654,67	46 654,67
Froehlich (1987)	55866,82	55 866,82
Mascarenhas (1991)	24198,61	24 198,61
Molinario (1991)	85617,7	85 617,70
Singh (1996)	15428,4	59 102,25
U.S Army of engennier (Saint Venant) 1997	127949,2	3 224700
ICOLD (1998)	64007,26	45 151,12
Média	75691,27	48248,83
Desvio Padrão	50688,07	17481,44

Tabela 14 - Caudais máximos associados aos diferentes tipos de rutura considerados

Após os resultados obtidos para o caudal máximo é necessário efetuar um hidrograma de rutura. Existem várias características que influenciam o hidrograma de rutura como a área da bacia e o volume a escoar, o declive e rugosidade da bacia, a densidade da água. A reprodução deste tipo de hidrograma foi obtida de forma simplificada utilizando o hidrograma triangular, semelhante ao de cheias normais em rios, no entanto, os hidrogramas de rutura de barragem são de crescimento maior e mais rápido, nesse sentido estipulou-se um tempo de 6 horas para o esvaziamento da albufeira. Este tempo foi estipulado em comparação com outros estudos semelhantes efetuados para rutura de barragem que usaram tempos entre 4 e 12 horas.

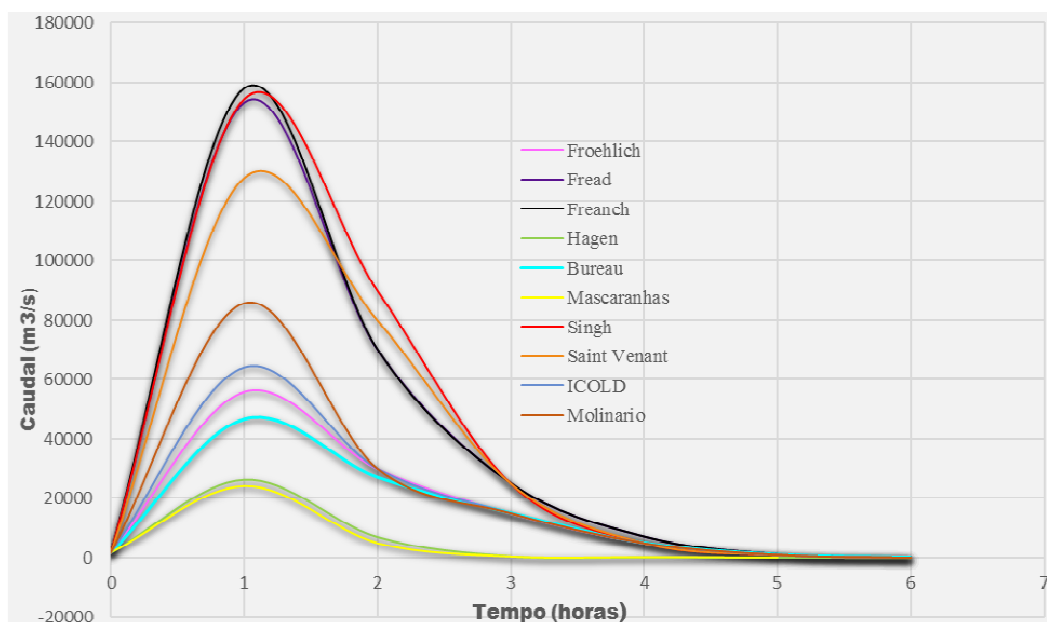


Figura 90 - comparação entre hidrogramas de rutura - cenário 1

Quando se efetua uma comparação entre os diversos hidrogramas de rutura para o cenário 1 (figura 90) a disparidade entre valores torna-se bastante acentuada, revelando uma grande incerteza nos resultados obtidos. De notar que os autores que apresentam fórmulas com o parâmetro “largura da brecha” apresentam os valores mais gravosos, entre eles Freanch, Fread, Singh e Saint-Venant, apresentando valores no intervalo de 120 000 m³/s a 160 000 m³/s. Para este cenário é notório que o parâmetro “largura da brecha” é preponderante nos resultados obtidos, traduzindo-se no parâmetro de incerteza.

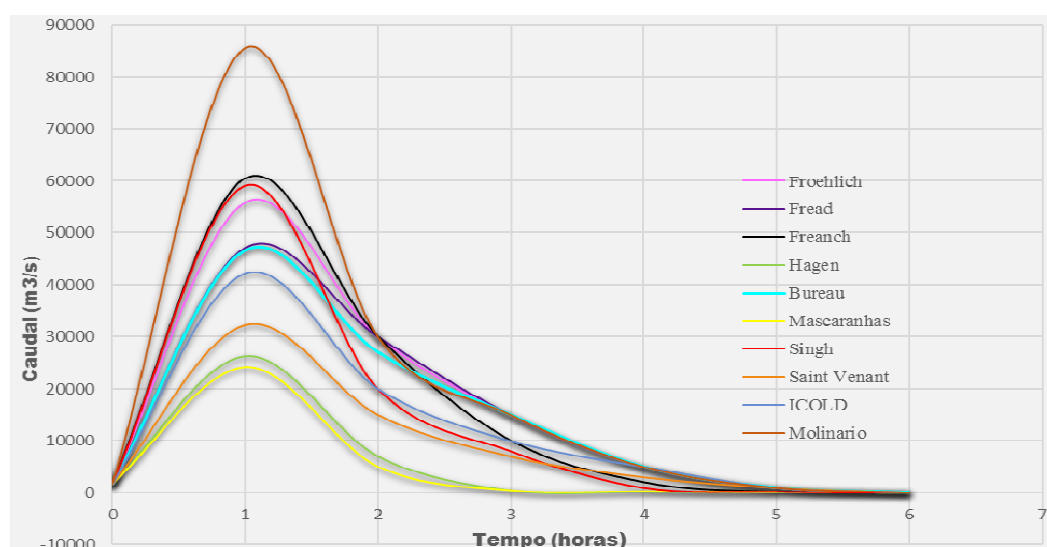


Figura 91 - Comparação entre hidrogramas de rutura - cenário 2

Quando efetuamos comparação entre os vários hidrogramas, na situação do cenário 2, (figura 91) verificamos resultados menos dispares que no cenário 1, ou seja com menos incerteza, sendo que a



solução apresentada por Molinaro é a mais gravosa, no entanto esta não possui o parâmetro largura da brecha. Por outro lado, as soluções apresentadas por Hagen e Mascarenhas também não possuem o parâmetro de largura da brecha, no entanto apresentam os resultados menos gravosos. Já as soluções apresentadas por Froehlinch e Bureau, apesar de não apresentarem o parâmetro largura da brecha apresentam valores dentro dos intervalos apresentados pelos restantes autores. Para o cenário 2 a maioria dos autores (Freanch, Singh, Froelinch, Fread, Bureau e ICOLD) apresentam valores no intervalo de 40 000 m³/s a 60 000 m³/s.

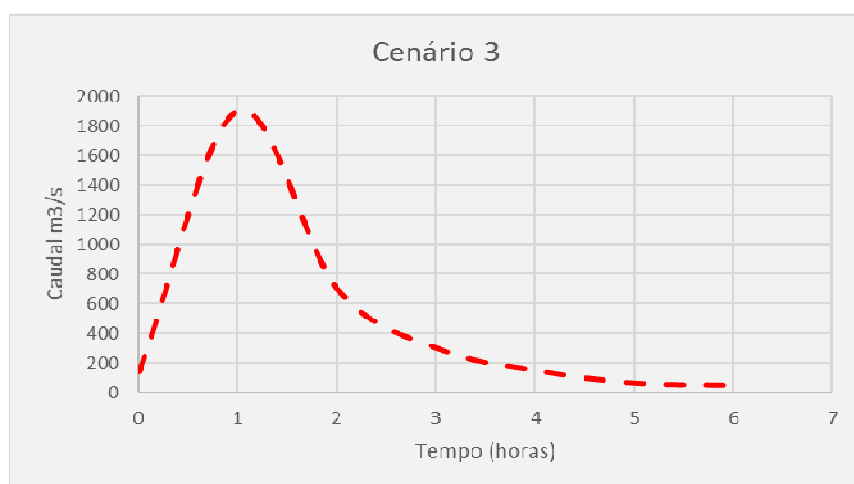


Figura 92 - hidrograma cenário 3 - funcionamento da Caniçada em condições extremas

Para o cenário 3 – funcionamento da barragem da caniçada em condições extremas (figura 92), encontramos os descarregadores no funcionamento pleno. Para este cenário o caudal máximo é determinado pelos órgãos operacionais da barragem, ou seja, através das 4 comportas no corpo da barragem é descarregado um caudal máximo de 1700 m³/s, a este soma-se o caudal máximo do descarregador de fundo com 142 m³/s, acrescentando-se ainda o caudal turbinado de 2*30 m³/s, totalizando um caudal máximo para o cenário 3 de 1902 m³/s.

Caudal máximo cenário 3 = caudal comportas + caudal descarregador fundo + caudal turbinado

Em comparação com os cenários 1 e 2, verificamos um caudal muito abaixo dos apresentados pelas expressões de rutura de barragem.

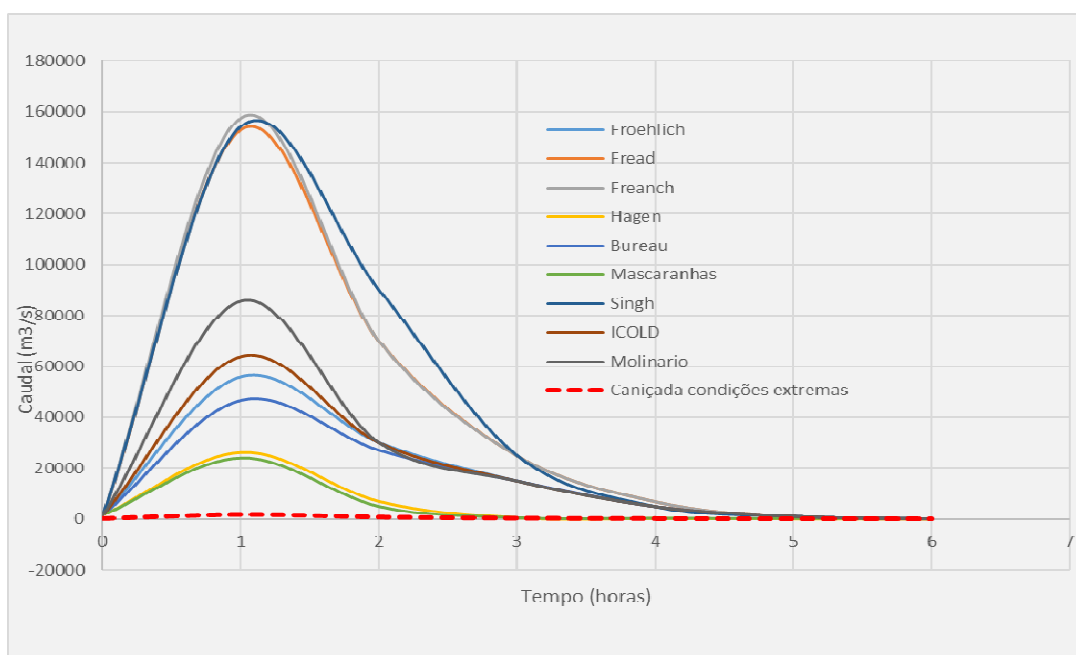


Figura 93 - Comparação entre hidrogramas cenário 1 e cenário 3

Comparamos os hidrogramas do cenário 1 (rutura total da barragem) e o cenário 3 (caniçada com funcionamento em condições extremas) (figura 93), verificamos no cenário 3 um caudal muito inferior aos estimados pelas expressões propostas pelos diversos autores em situação de rutura, mais uma vez, existe uma enorme disparidade de valores entre as duas situações, principalmente entre as expressões apresentadas pelos autores que incluem o parâmetro “largura da brecha” na sua formulação (Singh, Fread, Freanch) e o hidrograma do cenário 3. Como é natural, existe uma enorme incerteza associada à previsão dos hidrogramas resultantes de cenários de rutura de barragens.

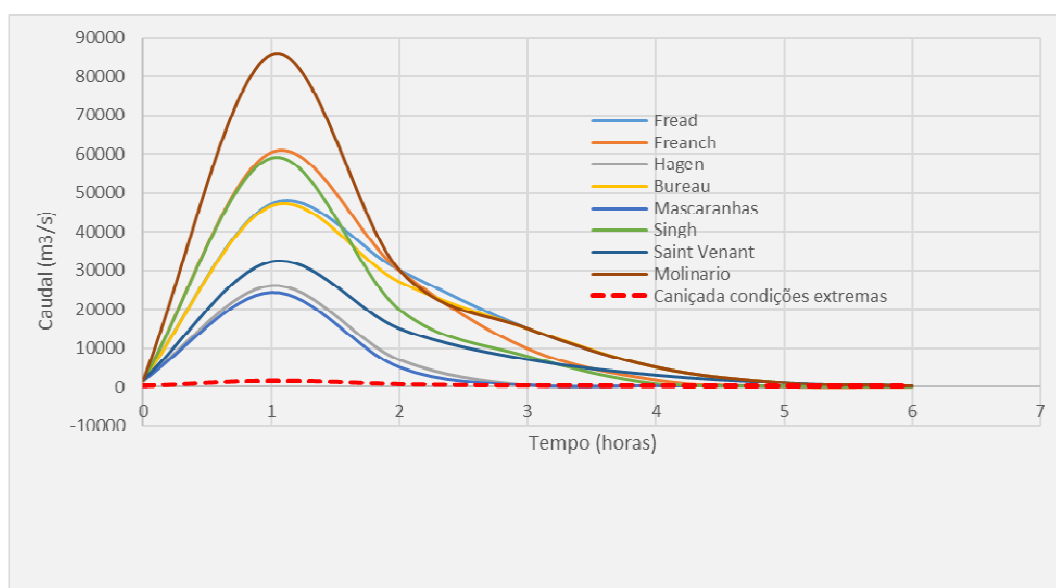


Figura 94 - Comparação entre hidrogramas cenário 2 e cenário 3



Quando comparamos os hidrogramas do cenário 2 e o hidrograma do cenário 3 (figura 94), continua a verificar-se uma disparidade de valores entre as duas situações.

Com esta análise já será de prever a diferença entre as manchas de inundação entre uma rutura total (cenário 2), uma rutura parcial da barragem (cenário 2) e o funcionamento da barragem em condições extremas (cenário 3).

6.2 RESULTADOS OBTIDOS – CENÁRIO 1

O estudo de cheias induzidas para esta região, equiparáveis em número suficiente para terem relevância estatística, é ainda muito escasso, pelo que se optou pela análise da média das expressões apresentadas pelos autores no capítulo anterior, não deixando de analisar o desvio padrão entre elas.

Após simulação com software Sobek foi possível determinar o tempo médio para a chegada da onda de inundação, o tempo para alcançar a máxima onda de inundação, a cota máxima atingida pela mesma, o caudal máximo observado em cada ponto assim como a velocidade da onda de inundação.

6.2.1 CHEGADA DA ONDA DE INUNDAÇÃO – CENÁRIO 1

Na tabela 15 são apresentados os resultados sobre os tempos de chegada da onda de inundação, para o cenário 1.

CENÁRIO 1													
Chegada da onda Inundação													
	Froehlich	Fread	Freanch	Hagen	Bureau	Mascaranhas	Singh	Saint Venant	ICOLD	Molinário	Média	Desvio padrao	Desvio padrao (%)
Ponte do Porto (Amares) - no 60	00:15:00	00:10:00	00:10:00	00:15:00	00:15:00	00:20:00	00:10:00	00:10:00	00:15:00	00:10:00	00:13:00	00:03:19	0%
Praia Fluvial da Ribeira (Amares)-no 56	00:20:00	00:20:00	00:20:00	00:35:00	00:30:00	00:35:00	00:20:00	00:20:00	00:25:00	00:20:00	00:24:30	00:06:06	0%
Aproveitamento Hidroeletrico do Bico- no 53	00:40:00	00:30:00	00:30:00	00:50:00	00:40:00	00:50:00	00:30:00	00:30:00	00:35:00	00:35:00	00:37:00	00:07:29	1%
Rio Homem	00:40:00	00:30:00	00:30:00	00:50:00	00:45:00	00:50:00	00:30:00	00:30:00	00:40:00	00:35:00	00:38:00	00:07:49	1%
Vila de Prado (Vila Verde)- no 51	00:45:00	00:35:00	00:35:00	00:51:00	00:50:00	01:00:00	00:35:00	00:40:00	00:45:00	00:40:00	00:43:36	00:07:51	1%
Aproveitamento Hidroeletrico do Ruães	00:55:00	00:40:00	00:45:00	01:10:00	00:55:00	01:20:00	00:40:00	00:45:00	00:50:00	00:50:00	00:53:00	00:12:17	1%
Limite concelho Vila Verde / Barcelos - no 46	01:05:00	00:50:00	00:50:00	01:20:00	01:10:00	01:20:00	00:50:00	00:50:00	01:05:00	01:00:00	01:02:00	00:11:27	1%
Aproveitamento Hidroeletrico de Penide- no 42	01:15:00	01:05:00	01:00:00	01:30:00	01:15:00	01:30:00	01:05:00	01:05:00	01:15:00	01:10:00	01:13:00	00:09:48	1%
Fiação de Barcelos - no 37	01:45:00	01:30:00	01:30:00	02:00:00	01:40:00	02:00:00	01:25:00	01:30:00	01:45:00	01:35:00	01:40:00	00:11:50	1%
Ponte Medieval de Barcelos - no 35	01:55:00	01:40:00	01:40:00	02:15:00	02:00:00	02:15:00	01:35:00	01:40:00	01:50:00	01:50:00	01:52:00	00:13:38	1%
E.T.A.R. Barcelos -no 33	02:05:00	01:45:00	01:50:00	02:25:00	02:15:00	02:20:00	01:40:00	01:50:00	02:10:00	02:00:00	02:02:00	00:14:42	1%
Mariz (Quinta de Argemil) - no 28	02:20:00	02:00:00	02:00:00	02:40:00	02:20:00	02:40:00	02:20:00	02:05:00	02:20:00	02:15:00	02:18:00	00:13:27	1%
Rio Caveiro -no 18	02:30:00	02:15:00	02:15:00	03:05:00	02:40:00	03:05:00	02:15:00	02:20:00	02:40:00	02:20:00	02:32:30	00:18:36	1%
Fão - no 8	02:50:00	02:30:00	02:30:00	03:15:00	03:00:00	03:25:00	02:30:00	02:40:00	02:40:00	02:45:00	02:48:30	00:18:19	1%
Foz do Cávado- no 1	03:10:00	02:45:00	02:45:00	03:30:00	03:15:00	03:45:00	02:40:00	02:50:00	03:10:00	03:00:00	03:05:00	00:20:07	1%

Tabela 15 - Chegada da onda de Inundação - Cenário 1



Analisando os tempos médios para a chegada da onda de inundação, referente ao cenário 1 (tabela 15) verifica-se que Mascarenhas é o autor mais liberal, apresentando resultados tranquilizadores, já Sighn e Fread serão os mais conservadores apresentando os resultados mais gravosos.

A Ponte do Porte no concelho de Amares, é atingida pela onda de inundação em 13 min, com um erro +/- 3 min, e encontra a cerca de 12 km da barragem da caniçada. A onda de inundação chega ao aproveitamento hidroelétrico do Bico (Amares) em 37 min, com um erro +/- 7 min. A Vila de Prado (concelho de Vila Verde), a cerca de 22 km da Barragem da Caniçada é atingida pela onda de inundação em 43min com um erro de +/- 7 min. A zona industrial de Padim da Graça (limite dos concelhos Vila Verde / Barcelos / Braga), a cerca de 27 km da barragem da Caniçada começa a ser afetada ao final de 1h 2min, com um erro +/-11 min. O “coração” da cidade de Barcelos, com a sua ponte medieval, a cerca de 45 km da Caniçada é afetado pela onda de inundação ao final de 1h 52min com um erro +/- 13 min. A onda de inundação atinge o Rio Caveiro (concelho de Esposende) ao final de 2h 32min com um erro +/- 18 min. A onda de inundação terá o seu destino final na foz do Cávado em Esposende ao fim de 3h 5min, e após ter percorrido cerca de 63 km. De notar que os resultados obtidos apresentam erros máximos de 1%.

6.2.2 TEMPO PARA A MÁXIMA INUNDAÇÃO – CENÁRIO 1

Na tabela 16 são apresentados os resultados sobre o tempo para atingir a máxima inundação, para o cenário 1.

CENÁRIO 1													
Tempo para a máxima inundação													
	Froehlich	Fread	Franch	Hagen	Bureau	Mascarenhas	Singh	Saint Venant	ICOLD	Molinário	Média	Desvio padrao	Desvio padrao (%)
Ponte do Porto (Amares) - no 60	01:10:00	01:10:00	01:10:00	01:10:00	01:20:00	01:10:00	01:10:00	01:10:00	01:10:00	01:10:00	01:11:00	00:03:00	0%
Praia Fluvial da Ribeira (Amares)-no 56	01:40:00	01:30:00	01:30:00	01:20:00	01:40:00	01:20:00	01:40:00	01:40:00	01:35:00	01:30:00	01:32:30	00:07:30	1%
Aproveitamento Hidroelétrico do Bico- no 53	02:10:00	01:50:00	01:50:00	01:50:00	02:10:00	01:50:00	02:00:00	02:10:00	02:00:00	01:50:00	01:58:00	00:08:43	1%
Rio Homem	02:10:00	01:50:00	01:50:00	01:50:00	02:10:00	01:50:00	02:00:00	02:10:00	02:00:00	01:50:00	01:58:00	00:08:43	1%
Vila de Prado (Vila Verde)- no 51	02:10:00	01:50:00	01:50:00	02:00:00	02:10:00	02:00:00	02:00:00	02:10:00	02:10:00	01:50:00	02:01:00	00:08:18	1%
Aproveitamento Hidroelétrico do Ruães	02:10:00	01:50:00	01:50:00	02:10:00	02:10:00	02:10:00	02:00:00	02:10:00	02:10:00	01:50:00	02:03:00	00:09:00	1%
Limite concelho Vila Verde / Barcelos - no 46	02:45:00	02:10:00	02:10:00	02:20:00	02:40:00	02:15:00	02:50:00	02:15:00	02:35:00	02:20:00	02:26:00	00:14:17	1%
Aproveitamento Hidroelétrico de Penide- no 42	04:00:00	03:20:00	03:20:00	03:15:00	04:00:00	03:15:00	03:20:00	03:30:00	03:50:00	03:40:00	03:33:00	00:17:12	1%
Fiação de Barcelos - no 37	04:30:00	04:30:00	04:30:00	04:10:00	04:30:00	04:10:00	05:15:00	05:15:00	04:40:00	04:45:00	04:37:30	00:21:29	1%
Ponte Medieval de Barcelos - no 35	05:30:00	05:45:00	06:00:00	04:30:00	05:30:00	04:30:00	05:45:00	05:45:00	05:30:00	05:30:00	05:25:30	00:29:17	2%
E.T.A.R. Barcelos -no 33	05:35:00	05:50:00	06:00:00	04:50:00	05:35:00	04:45:00	06:00:00	06:00:00	05:45:00	05:45:00	05:36:30	00:26:05	2%
Mariz (Quinta de Argemil) - no 28	06:00:00	06:00:00	06:00:00	05:15:00	06:00:00	05:15:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	05:51:00	00:18:00	1%
Rio Caveiro -no 18	06:00:00	06:00:00	06:00:00	05:30:00	06:00:00	05:30:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	05:54:00	00:12:00	1%
Fão - no 8	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	00:00:00	0%
Foz do Cávado- no 1	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	00:00:00	0%

Tabela 16 - Tempo para a máxima inundação - Cenário 1

Analisando os tempos para a máxima inundação (tabela 16) verifica-se que de entre os autores mais liberais estão Singh, Saint Venant e Froehlich, apresentando resultados tranquilizadores, já



Hagen e Mascarenhas serão os mais conservadores apresentando os resultados mais gravosos. A máxima inundação é atingida na Ponte do Porte no Concelho de Amares em 1h 11min, com um erro de +/- 3 minutos. A máxima inundação chega ao aproveitamento hidroelétrico do Bico (Amares) em 1h 58m com um erro de +/- 8min. A vila de Prado tem a sua onda de inundação máxima ao final de 2h 1min, com um erro +/- 8min, assim como o aproveitamento hidroelétrico de Ruães é fustigado pela máxima inundação aos 2h 3min, com um erro de +/- 9min. A zona Industrial de Padim da Graça é atingida em 2h 26min +/- 14 min. A ponte medieval de Barcelos tem a onda máxima de inundação após 5h 25min +/-26 min. Neste caso o erro máximo é de 2%.

6.2.3 CAUDAL MÁXIMO DA ONDA DE INUNDAÇÃO – CENÁRIO 1

Na tabela 17 são apresentados os resultados sobre os caudais máximos da onda de inundação, para o cenário 1.

CENÁRIO 1												
Caudal máximo da Onda de Inundação (m ³ /s)												
	Froehlich	Fread	Freanch	Hagen	Bureau	Mascarenhas	Singh	Saint Venant	ICOLD	Molinário	Média	Desvio padrao
Ponte do Porto (Amares) - no 60	49800	134000	137000	24500	42000	22000	135000	113000	57000	75000	78930	44297
Praia Fluvial da Ribeira (Amares) - no 56	39500	111000	114000	17750	33500	16500	115100	95000	45000	59000	64635	38196
Aproveitamento Hidroelétrico do Bico- no 53	35500	100000	104000	14750	30000	13500	107000	88000	39500	51800	58405	35639
Rio Homem	35500	100000	103000	14750	30000	13500	107000	88000	39500	51800	58305	35512
Vila de Prado (Vila Verde)- no 51	35000	97500	102000	14400	29500	13100	103500	86000	39000	51500	57150	34648
Aproveitamento Hidroelétrico do Ruães	27000	60000	66800	12200	23000	11200	68000	57000	30000	38100	39330	20858
Limite concelho Vila Verde / Barcelos - no 46	13800	36000	36000	7100	12400	6500	40000	38000	1500	18700	21000	14194
Aproveitamento Hidroelétrico de Penide- no 42	12100	22000	22500	5900	11000	5400	23100	21000	12700	14400	15010	6418
Fiação de Barcelos - no 37	11000	20000	20000	5500	11000	5200	22000	19200	12000	13000	13890	5793
Ponte Medieval de Barcelos -no 35	10700	19000	19250	5150	10000	4700	20000	18250	11400	12700	13115	5468
E.T.A.R. Barcelos -no 33	10700	19000	19200	5100	10000	4700	19800	18100	11300	12600	13050	5434
Mariz (Quinta de Argemil) - no 28	10700	19000	19200	5100	9800	4700	19800	18100	11300	12600	13030	5446
Rio Caveiro -no 18	10600	18800	18600	5050	97000	4600	19800	18000	11200	12600	21625	25673
Fão - no 8	10400	18400	18500	4900	9500	4500	19250	17500	11000	12300	12625	5279
Foz do Cávado- no 1	10100	18000	18500	4800	9200	4450	19000	17000	10700	12100	12385	5223

Tabela 17 - Caudal máximo da onda de inundação

Analisando os caudais máximos atingidos pela onda de inundação (tabela 17) verifica-se que de entre os autores mais liberais estão Mascarenhas e Hagen, apresentando os caudais mais baixos, já Freanch e Singh serão os mais conservadores apresentando os valores de caudais mais altos.

As zonas mais próximas da barragem são as que receberão caudais mais elevados. A ponte do porto (figura 95) receberá um caudal de 78930 m³/s, assim como a Vila de Prado terá um caudal máximo de 57150 m³/s, a zona da ponte medieval de Barcelos com 13115 m³/s, a foz do Cávado é atingida ainda com 12385 m³/s.

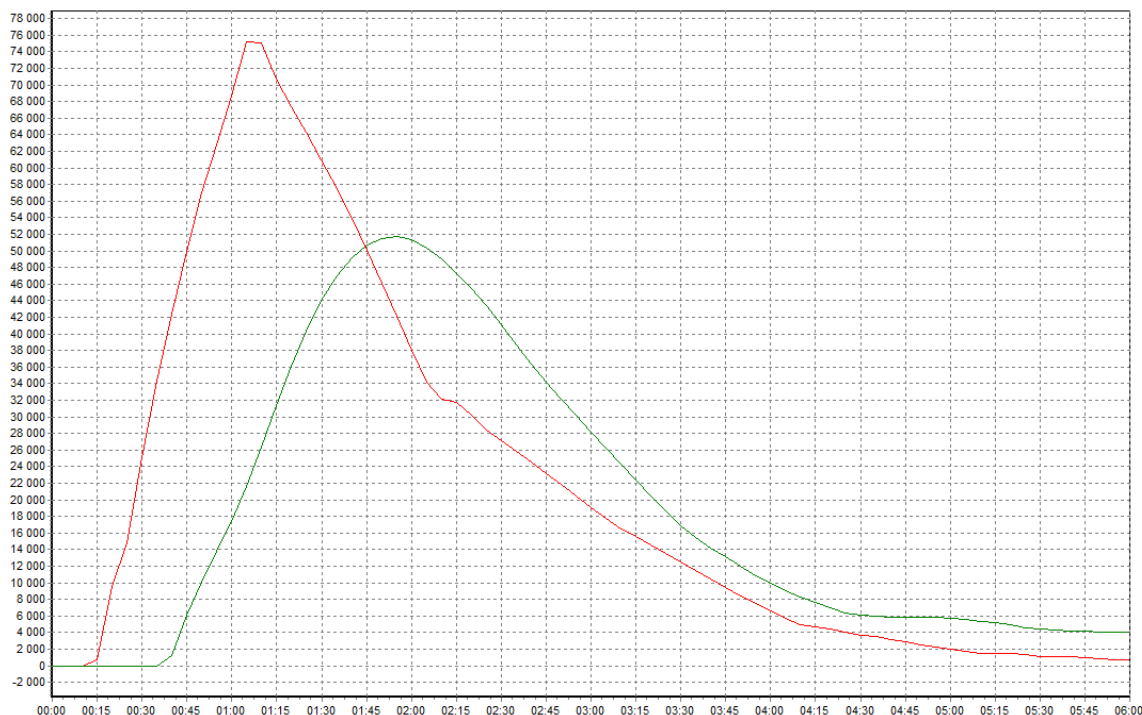


Figura 95 - Tempo para máxima cheia - Molinário - cenário 1 (eixo xx tempo (h) – eixoyy caudal (m3) (vermelho – Ponte do Porto; verde- confluência Homem - Cávado – Rio Cávado; azul – foz do Cávado)

6.2.4 VELOCIDADE MÁXIMA DA ONDA DE INUNDAÇÃO – CENÁRIO 1

Na tabela 18 são apresentados os resultados sobre as velocidades máximas da onda de inundação, para o cenário 1.

CENÁRIO 1												
Velocidade máxima da Onda de Inundação (m/s)												
	Froehlich	Fread	Freanch	Hagen	Bureau	Mascaranhas	Singh	Saint Venant	ICOLD	Molinário	Média	Desvio padrao
Ponte do Porto (Amares) - no 60	8,30	11,30	11,50	6,80	7,80	5,80	8,40	10,80	8,80	9,60	8,91	1,80
Praia Fluvial da Ribeira (Amares)-no 56	11,20	16,00	16,00	8,00	10,60	7,80	11,60	15,00	11,80	13,20	12,12	2,81
Aproveitamento Hidroeletrico do Bico- no 53	7,30	9,30	9,00	5,50	7,90	5,50	7,20	9,40	7,50	8,20	7,68	1,32
Rio Homem	8,40	13,80	9,00	6,30	7,90	6,10	8,40	13,00	9,00	10,20	9,21	2,40
Vila de Prado (Vila Verde)- no 51	6,10	10,00	10,30	4,80	5,60	4,80	6,10	9,20	6,40	7,20	7,05	1,96
Aproveitamento Hidroeletrico do Ruães	5,20	5,80	5,60	5,80	5,30	4,80	5,10	5,60	5,50	5,20	5,39	0,31
Limite concelho Vila Verde / Barcelos - no 46	4,60	5,20	5,90	4,50	4,60	4,30	4,70	4,90	4,60	4,80	4,81	0,43
Aproveitamento Hidroeletrico de Penide- no 42	6,00	6,00	5,90	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	5,99	0,03
Fiação de Barcelos - no 37	3,60	4,00	4,20	3,50	3,60	3,30	3,50	3,80	3,70	3,60	3,68	0,25
Ponte Medieval de Barcelos -no 35	4,30	4,60	4,70	3,60	4,20	3,80	4,30	7,80	4,50	4,60	4,64	1,11
E.T.A.R. Barcelos -no 33	7,50	7,80	7,60	6,60	7,20	6,50	7,50	7,60	7,50	7,60	7,34	0,42
Mariz (Quinta de Argemil)- no 28	2,50	2,80	2,90	3,70	2,50	1,80	2,50	2,80	2,80	3,70	2,80	0,54
Rio Caveiro -no 18	4,50	5,20	5,30	4,80	4,30	3,80	4,50	5,00	4,50	4,80	4,67	0,42
Fão - no 8	2,50	2,60	2,60	2,30	2,60	2,40	2,50	2,60	2,40	2,70	2,52	0,12
Foz do Cávado- no 1	3,80	5,10	5,20	3,60	3,80	2,60	3,70	5,00	4,00	4,20	4,10	0,77

Tabela 18 - Velocidade máxima atingida pela onda de inundação - Cenário 1



A velocidade máxima (tabela 18) atingida está intimamente ligada com o atrito que o fluido possa encontrar ao longo do canal, assim como a própria geometria do canal, incluindo os obstáculos que vai encontrando ao longo do percurso. De salientar que este modelo apenas considerou um coeficiente de atrito, os açudes, e os aproveitamentos hidroelétricos como obstáculos no percurso do fluido, não estando considerado qualquer edifício para lá das margens do rio.

De entre os autores mais liberais, relativamente á velocidade atingida pela onda de inundação encontramos Mascarenhas e Hagen, apresentando as velocidades mais baixas, já Freanch e Fread serão os mais conservadores apresentando os valores de velocidades mais altos.

A interligação Rio Homem – Rio Cávado é atingida com a velocidade de 9.21 m/s, de salientar que a montante se encontra o aproveitamento hidroelétrico do Bico. Na Vila de Prado a velocidade máxima será de 7.05 m/s +/- 1.96 m/s. A zona industrial de Padim da Graça terá uma velocidade máxima de 4.81 m/s +/- 0.43 m/s. A medieval de Barcelos será fustigada com uma onda de inundação de velocidade máxima de 4.64 m/s +/- 1.11 m/s. A velocidade máxima da onda de inundação na foz do Cávado será de 4.10 m/s +/-0.77 m/s

6.2.5 COTA MÁXIMA DA ONDA DE INUNDAÇÃO – CENÁRIO 1

Na tabela 19 são apresentados os resultados sobre as cotas máximas atingidas pela onda de inundação, para o cenário 1, com os quais é possível elaborar mapas de inundação.

CENÁRIO 1												
Cota máxima da Onda de Inundação (m)												
	Froehlich	Fread	Freanch	Hagen	Bureau	Mascarenhas	Singh	Saint Venant	ICOLD	Molinário	Média	Desvio padrao
Ponte do Porto (Amares) - no 60	46,5	64,0	65,0	39,0	45,0	38,3	65,0	60,8	48,3	52,2	52,4	10,0
Praia Fluvial da Ribeira (Amares)-no 56	40,8	51,0	51,5	35,0	39,5	34,6	52,0	49,8	41,8	44,0	44,0	6,4
Aproveitamento Hidroeletrico do Bico- no 53	37,0	50,0	50,5	32,5	37,3	32,0	51,5	49,0	39,0	41,0	42,0	7,2
Rio Homem	38,2	50,0	50,5	31,5	37,0	31,0	51,5	49,0	39,0	41,0	41,9	7,5
Vila de Prado (Vila Verde)- no 51	38,2	50,0	50,5	30,3	37,2	29,4	51,5	49,0	39,2	41,0	41,6	7,8
Aproveitamento Hidroeletrico do Ruães	38,2	50,0	50,5	30,0	37,2	29,4	51,5	48,5	39,2	40,6	41,5	7,9
Límite concelho Vila Verde / Barcelos - no 46	38,2	50,0	50,5	30,0	37,0	29,2	51,5	48,5	39,0	41,0	41,5	7,9
Aproveitamento Hidroeletrico de Penide- no 42	37,6	50,0	50,0	27,3	36,2	26,4	51,5	48,5	38,2	40,6	40,6	8,8
Fiação de Barcelos - no 37	19,6	24,3	24,5	15,8	18,8	14,6	24,6	24,0	19,8	20,6	20,7	3,5
Ponte Medieval de Barcelos -no 35	18,6	23,5	23,8	13,8	18,8	13,4	24,0	23,0	18,8	19,8	19,8	3,7
E.T.A.R. Barcelos -no 33	17,2	22,5	22,5	12,8	17,0	11,4	23,2	22,3	17,8	18,6	18,5	3,9
Mariz (Quinta de Argemil) - no 28	15,0	19,8	20,0	10,5	14,5	10,0	20,2	19,3	15,3	16,3	16,1	3,6
Rio Caveiro -no 18	8,8	11,0	11,0	6,5	8,4	6,4	11,2	10,8	8,8	9,3	9,2	1,7
Fão - no 8	6,6	8,6	8,5	4,8	6,2	4,8	8,8	8,3	7,0	7,0	7,1	1,4
Foz do Cávado- no 1	2,6	3,3	3,5	1,5	2,3	1,4	3,4	3,3	2,6	2,8	2,7	0,7

Tabela 19 - Cota máxima da onda de inundação – Cenário 1



6.2.6 MAPAS DE INUNDAÇÃO – CENÁRIO 1

Com os resultados observados na tabela 19 é possível a elaboração de mapas de inundação para o cenário 1.

De entre os autores mais liberais, relativamente à cota atingida pela onda de inundação encontramos Mascarenhas e Hagen, apresentando cotas mais baixas, traduzindo-se em menor população em risco e menos danos económicos, já Singh, Freanch e Fread serão os mais conservadores apresentando cotas mais elevadas. De salientar que, quer Hagen quer Mascarenhas não apresentam o parâmetro “largura da brecha” na sua formulação, contrariamente ao apresentado por Freanch e Fread.

Analisando o desvio padrão dos resultados obtidos para as cotas atingidas pela onda de inundação verifica-se que a maior incerteza acontece nas regiões imediatamente a jusante da barragem traduzindo-se em erros que rondam os 10m, no entanto nas regiões junto à foz do rio Cávado as incertezas são diminutas, traduzindo-se em erros não superiores a 2m, pelo se considera aceitável a utilização de valores intermédios.

Tomando como exemplo a região da ponte do Porto, verifica-se que o cenário mais conservador é apresentado por Freanch e Singh que indicam a cota 65m como máxima cheia, já o cenário mais liberal é apresentado por Mascarenhas que refere como cota máxima 38.3. Entre os mais liberais e os mais conservadores existe para este local uma diferença de cotas de 26.7m. No entanto essa diferença não se traduz na análise dos danos económicos (DE) e da população em risco. Analisando a figura 96 verifica-se que quer no cenário mais conservador quer no mais liberal se verifica a inundação da Ponte do Porto, e da ETAR de Prozelo, a diferença resume-se ao empreendimento turístico Quinta do Burgo, que para os mais conservadores, este ficará inundado e para os liberais estará a salvo. Dado que a diferença entre liberais e conservadores não se traduz em diferenças significativas em termos de danos económicos e população em risco, optou-se por adotar de um “cenário intermédio” para a elaboração dos mapas de inundação, ou seja, optou-se por representar um mapa com cotas intermédias, resultantes da média aritmética entre as cotas apresentadas pelos diversos autores, assumindo-se o erro relativamente a este processo (tabela 19).



Figura 96 - relação entre cenário mais liberal (a rosa), o cenário mais conservador (a amarelo) e o cenário intermédio (vermelho)

Para um cenário intermédio, relativamente às cotas máximas atingidas pela onda de inundação verifica-se que a Ponte do Porto (Amares) que se encontra á cota 37.2 será atingida por uma onda de inundação que atinge a cota 52.4 +/- 10 m, ou seja, a ponte do porto terá cerca de 15 m de coluna de água acima do seu tabuleiro.

Nesta zona, relativamente a infraestruturas de salientar a inutilização da Ponte medieval do Porto e da Ponte do Porto travessia entre os concelhos de Amares e Braga (EN205), rua das Almeidas e a rua António Boaventura (acesso ponte do porto – medieval), fica comprometida. Quanto a edifícios públicos, temos a ETAR de Prozelo completamente inundada. A nível de edificações relevantes de carácter privado é de salientar que se trata de uma zona bastante turística estando ameaçadas algumas edificações como a Quinta Lago dos Cisnes (Amares) (figura 97), a Casa da Ponte do Porto (Braga), sendo que a onda de inundação inunda parcialmente a Quinta do Burgo (Amares). A população afetada nesta zona é mínima com menos de uma dezena de habitações afetadas. A onda de inundação, para esta zona, mostra-se mais prejudicial no concelho de Amares do que no concelho de Braga. (figura 98).



Figura 97 - Perfil de inundação- zona ponte do porto - cenário 1



Figura 98 - onda de inundação - zona Ponte do Porto - Cenário 1



Figura 99 - Onda de Inundação - Ponte do Bico - Cenário 1

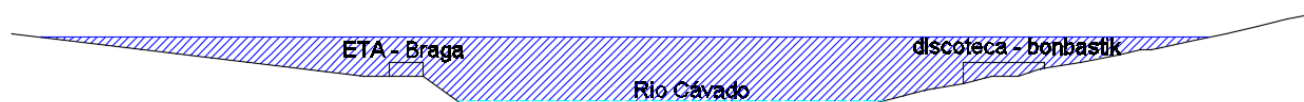


Figura 100- Perfil de inundação- zona ponte do Bico - cenário 1



A ponte do Bico/ aproveitamento hidroelétrico do Bico (Limite de concelho Braga / Amares/Vila Verde) que se encontra à cota 20.34 m, será inundado até à cota 42 m (figuras 99 e 100), ou seja, acima do tabuleiro da Ponte existirá uma coluna de água de cerca de 22 m, e o aproveitamento hidroelétrico completamente inundado.

Analisando da confluência Rio Cávado – Rio Homem há a salientar a perda das infraestruturas viárias como a Ponte do Bico, EN 201 a rua da Marginal (concelho de Braga), assim como a praia fluvial de Palmeira. No que respeita ao concelho de Amares há a salientar a inundação da EN 205, ou seja, encontram-se inundadas todas as infraestruturas entre a rua das Mimosas e a EN 205. O aproveitamento hidroelétrico do Bico será bastante afetado tornando inutilizado. Edifícios de carácter público de referir a Estação de Tratamento de Água da Câmara Municipal de Braga. No que respeita a edifícios privado com relevância há a salientar, a perda de alguns edifícios de diversão como discoteca e bar.

Nesta região a onda de inundação mostra-se bastante prejudicial para o concelho de Vila Verde, com a perda da maior massa habitacional (cerca de 200 habitantes). O concelho de Amares tem ameaçado grande parte das indústrias (cerca de 10) e algumas habitações, sendo que Braga vê ameaçada a sua estação de tratamento de água e uma indústria, para além de meia dúzia de habitações.

Para a região da Ponte do Bico poderá dizer-se que se encontram ameaçados cerca de 300 habitantes, quanto a danos económicos, a salientar temos mais de uma dezena de indústrias, a inundação de duas estradas nacionais e cerca de uma dezena de caminhos públicos, de extrema relevância em caso de necessidade de fuga da população.



Figura 101 – Onda de inundação na Vila de Prado (Vila Verde) – Cenário 1



Figura 102 - Perfil de inundação- Vila de Prado - cenário 1

A Vila de Prado habitado por 4408 habitantes, no concelho de Vila Verde, será inundada até cota 41.6 m (figuras 101 e 102, trata-se de uma região bastante habitacional, e onde a possibilidade de perda de vidas humanas se torna mais visível. Pela mancha verificamos a inundação dos lugares de Fontainha, Carvalhinhos e Faial, sendo que a população em risco (PER) nesta região será de cerca de 50% da população total da Vila, desta forma considera-se PER igual a 2204 habitantes. O concelho de Braga apresenta sobretudo zonas verdes, no entanto, também existe a inundação de algumas habitações (cerca de 50 habitantes) assim como de duas indústrias. No que se refere a infraestruturas viárias há a salientar a inundação da EN 201 e da EN 205, sendo que todas as ruas entre as margens do rio e a rua 1 Lugar de São Sebastião (EN 205) se encontram inundadas, infraestruturas estas indispensáveis para a fuga da população em caso de evento adverso.



Figura 103 - Onda de inundação - Zona Industrial Padim da Graça - Cenário 1



Figura 104 - Perfil de inundação- Vila de Prado - cenário 1

A região da Zona industrial de Padim da Graça (concelho de Braga) será inundada até à cota 41,6 m (figura 103 e 104), num território onde predominam indústrias no concelho de Braga e zona verde com algumas habitações no concelho de Vila Verde. De salientar que o mais problemático acontecerá no concelho de Braga não só com a perda de mais de uma dezena de indústrias, a inoperacionalidade da sua estação de tratamento de águas residuais (ETAR), e a inundação de algumas infraestruturas viárias, nomeadamente a EN 205 (rua da Veiga e Rua do Seixido), assim como o caminho municipal (CM) 564. Ainda no concelho de Braga poderá considerar-se uma PER de cerca de 100 habitantes. Relevante para o concelho de Vila Verde será a inundação de mais de uma dezena de habitações em Cabanelas, e uma perda de uma grande área de terrenos agrícolas.

Em resumo nesta região a PER será de cerca de 150 habitantes, mas é de salientar os graves danos económicos (DE).

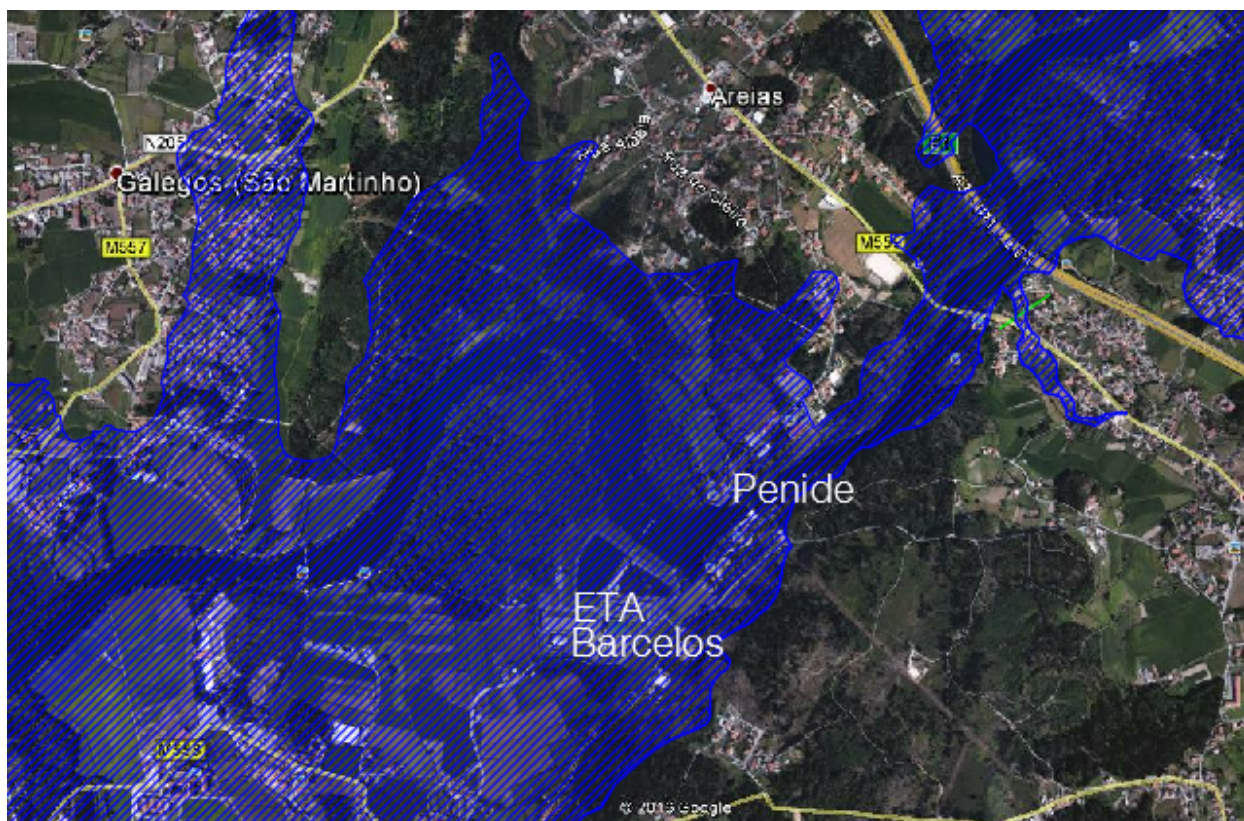


Figura 105 - Onda de Inundação - Penide (Barcelos) - Cenário 1



Figura 106 - Perfil de inundação- Penide - cenário 1

O aproveitamento hidroelétrico de Penide, que se encontra à cota 21 m, será inundado até á cota 41.6 m (figura 105 e 106), ficando desta forma inoperacional. A estação de tratamento de água de Barcelos (ETA) que se encontra á cota 16, ficará também incapacitada. Relativamente a infraestruturas viárias há a salientar a inundação parcial da EN 205, na freguesia de Galegos S. Martinho, o CM 553 e CM 559, para além de vários caminhos públicos. No que respeita a população em risco, a freguesia de Galegos S. Martinho (concelho Barcelos), com uma população de 1930 habitantes, onde cerca de 50% estará em risco, e a freguesia da Lama (concelho de Barcelos), com uma população de 1228 habitantes, destes cerca de 40% apresentam-se em risco. Em resumo, a PER desta região, para o cenário 1 será de cerca de 1500 habitantes, sendo que os danos económicos se resumem à perda da ETA de Barcelos, e a uma grande área de floresta.

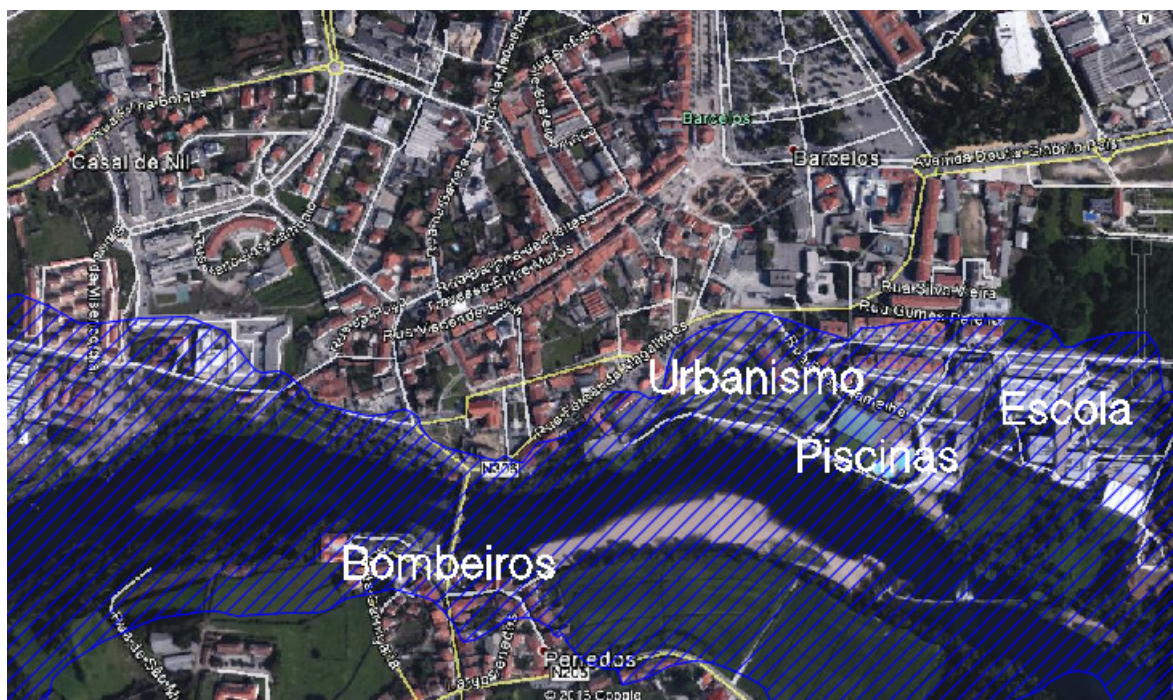


Figura 107 - Onda de inundação - Ponte Medieval (Barcelos) - Cenário 1

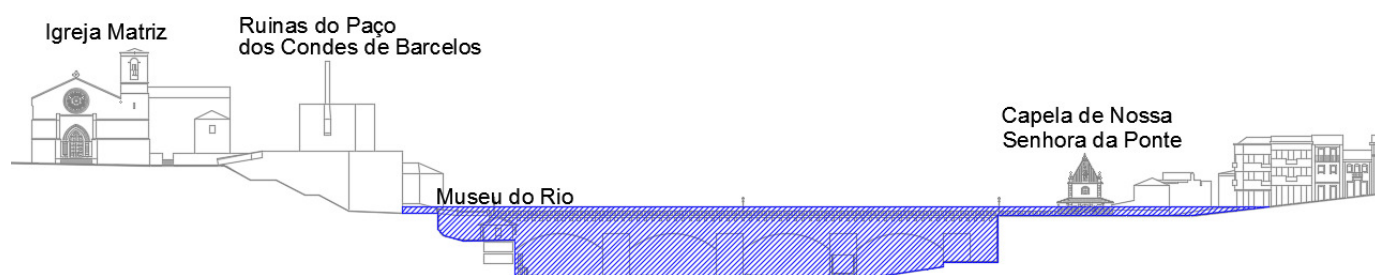


Figura 108 - Perfil de inundação- cidade de Barcelos - cenário 1

Para a região da cidade de Barcelos (ponte medieval) a onda de inundação atingirá a cota 19,8 m, onde o tabuleiro da ponte medieval se encontra à cota 18 m, desta forma o tabuleiro da ponte medieval terá uma coluna de água de cerca de 2 m (figuras 107 e 108). Nesta zona, verificamos vários equipamentos públicos ameaçados pela onda de inundação, tais como a Escola Secundária de Barcelos, as Piscinas Municipais, o edifício do departamento de Urbanismo da Câmara Municipal, os Bombeiros Voluntários de Barcelinhos, a capela da Sr.^a da Ponte e o Museu do Rio. Relativamente a habitações observamos o Bairro da Misericórdia (Barcelos) parcialmente inundado, assim como cerca de uma dezena de habitações em Barcelinhos. A população em risco (PER) será de cerca de 100 habitantes. Relativamente a infraestruturas viárias observamos a inoperacionalidade da ponte medieval, a rua Fernando Magalhães (junto às ruínas paço dos condes), a rua Rosa Ramalho (junto às piscinas) em Barcelos, em Barcelinhos temos a rua Miguel Ângelo e a parcialmente a EN 205.

Nesta região há a salientar os catastróficos danos económicos, com a perda de uma grande parte de equipamentos públicos.

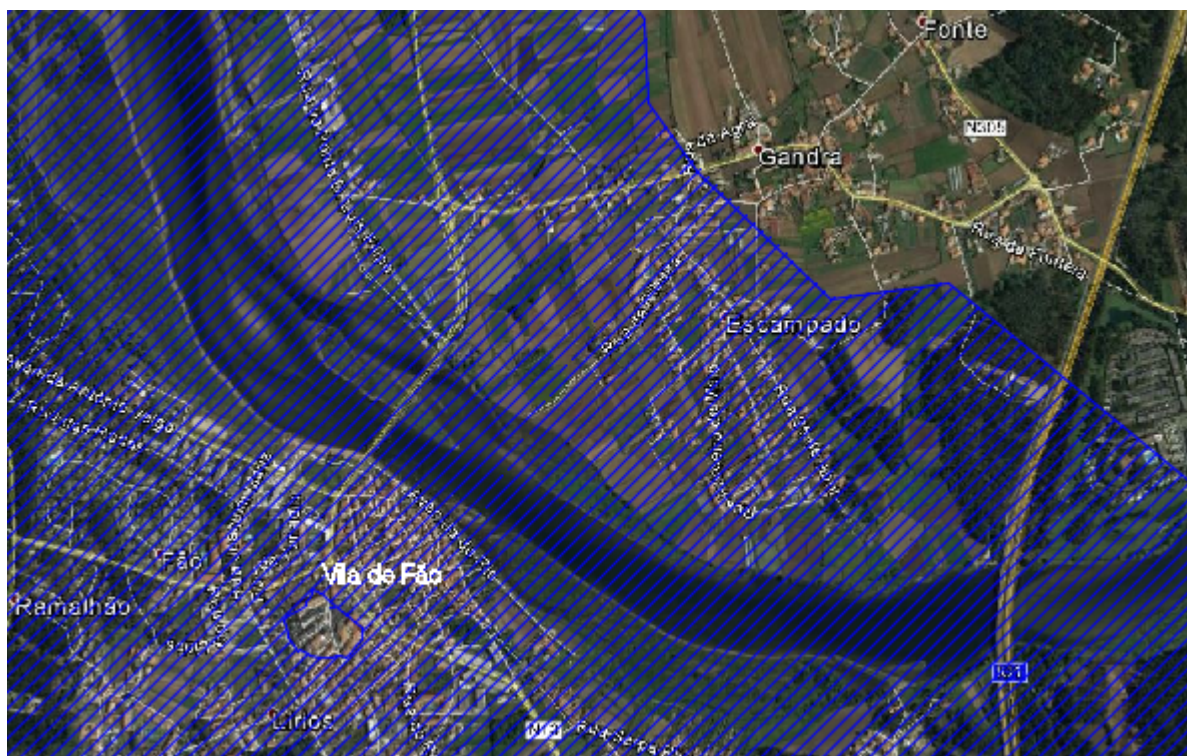


Figura 109 - Onda de inundação em Fão (Esposende) - Cenário 1

Figura 110 - Perfil de inundação- Vila de Fão - cenário 1

Analisando a região de Fão que varia entre a cota 3 m e a cota 12 m, verificamos uma mancha de inundação que atinge a cota 7.1 m (figuras 109 e 110), desta forma praticamente toda a Vila de Fão fica inundada, assim como a zona de Escarpado (norte de Fão), excetuando-se uma pequena zona da Vila, no lugar de Lírios, que se encontra à cota 12 m. No entanto até estes residentes ficariam ameaçados, pois estariam completamente isolados, sem qualquer solução de fuga, pois todas as infraestruturas viárias se encontram inoperacionais.

Desta forma podemos dizer que a onda de inundação do cenário 1 seria devastador para a Vila de Fão, com a sua destruição total. Toda a sua população de 3080 habitantes se encontra em risco, e os danos económicos são catastróficos.



Figura 111 - Onda de inundação na cidade de Esposende - Cenário 2

Na região de Esposende a onda de inundação sobe até à cota 2.7 m (figura 111), não chegando mesmo a inundar a marginal que se encontra á cota 4m, nem a zona do farol que se encontra á cota 6 m. Para a cidade de Esposende a onda de inundação não apresenta grande problemática. A freguesia de Ofir, apresenta-se como a região com maior inundação. Trata-se de uma zona de habitações de férias e alguns empreendimentos turísticos, onde se verifica cerca de 30 edifícios habitacionais inundados. Dado que a população residente em Ofir varia bastante consoante a época do ano poderá considerar-se um PER média de cerca 100 habitantes. Relativamente a infraestruturas viárias existe apenas a inundação de menos de uma dezena de caminhos públicos. Os danos económicos desta região são pouco preocupantes.

6.2.7 RISCO PARA O VALE A JUSANTE DA BARRAGEM DA CANIÇADA – CENÁRIO 1

Com a análise às manchas de inundação, é possível determinar qual o risco para o vale associado á rutura de barragem com extensão de 162 m (cenário 1). Relativamente á probabilidade de ocorrência de acontecimento adverso, considera-se que quer a estrutura da barragem, quer os seus órgãos operacionais não apresentam qualquer anomalia, nesse sentido, o cenário de rutura de barragem será um acontecimento raro. No que concerne à escala de severidade, verifica-se uma



população em risco superior a 8000 habitantes e danos económicos graves, assim considera-se uma severidade Alta. Utilizando a matriz de classificação e priorização do risco (tabela 6), obtemos um total de 4 pontos com um código de risco laranja significando “risco muito preocupante”, mostrando desta forma a necessidade emergente da elaboração de Plano de emergência para a barragem da Caniçada.

6.3 RESULTADOS OBTIDOS – CENÁRIO 2

6.3.1 CHEGADA DA ONDA DE INUNDAÇÃO – CENÁRIO 2

Na tabela 21 são apresentados os resultados sobre os tempos de chegada da onda de inundação, para o cenário 2.

CENÁRIO 2													
Chegada da onda Inundação													
	Frøehlich	Fread	Freanch	Hagen	Bureau	Mascarenhas	Singh	Saint Venant	ICOLD	Molinário	Média	Desvio padrao	Desvio padrao (%)
Ponte do Porto (Amares) - no 60	00:15:00	00:15:00	00:10:00	00:15:00	00:15:00	00:20:00	00:15:00	00:15:00	00:15:00	00:10:00	00:14:30	00:02:42	0%
Praia Fluvial da Ribeira (Amares)-no 56	00:20:00	00:30:00	00:20:00	00:35:00	00:30:00	00:35:00	00:20:00	00:35:00	00:30:00	00:20:00	00:27:30	00:06:25	0%
Aproveitamento Hidroelétrico do Bico- no 53	00:40:00	00:40:00	00:40:00	00:50:00	00:40:00	00:50:00	00:40:00	00:45:00	00:40:00	00:35:00	00:42:00	00:04:35	0%
Rio Homem	00:40:00	00:45:00	00:40:00	00:50:00	00:45:00	00:50:00	00:40:00	00:50:00	00:45:00	00:35:00	00:44:00	00:04:54	0%
Vila de Prado (Vila Verde)- no 51	00:45:00	00:50:00	00:45:00	00:51:00	00:50:00	01:00:00	00:45:00	00:50:00	00:50:00	00:40:00	00:48:36	00:05:04	0%
Aproveitamento Hidroelétrico do Ruães	00:55:00	00:55:00	00:50:00	01:10:00	00:55:00	01:20:00	00:50:00	01:05:00	01:00:00	00:50:00	00:59:00	00:09:26	1%
Limite concelho Vila Verde / Barcelos - no 46	01:05:00	01:10:00	01:05:00	01:20:00	01:10:00	01:20:00	01:10:00	01:15:00	01:10:00	01:00:00	01:10:30	00:06:06	0%
Aproveitamento Hidroelétrico de Penide- no 42	01:15:00	01:20:00	01:15:00	01:30:00	01:15:00	01:30:00	01:15:00	01:25:00	01:20:00	01:10:00	01:19:30	00:06:30	0%
Fiação de Barcelos - no 37	01:45:00	01:45:00	01:45:00	02:00:00	01:40:00	02:00:00	01:40:00	01:55:00	01:50:00	01:35:00	01:47:30	00:08:08	1%
Ponte Medieval de Barcelos - no 35	01:55:00	02:00:00	01:50:00	02:15:00	02:00:00	02:15:00	01:55:00	02:10:00	02:05:00	01:50:00	02:01:30	00:08:57	1%
E.T.A.R. Barcelos -no 33	02:05:00	02:10:00	02:05:00	02:25:00	02:15:00	02:20:00	02:05:00	02:20:00	02:35:00	02:00:00	02:14:00	00:10:26	1%
Mariz (Quinta de Argemil) - no 28	02:20:00	02:25:00	02:20:00	02:40:00	02:20:00	02:40:00	02:20:00	02:35:00	02:30:00	02:15:00	02:26:30	00:08:40	1%
Rio Caveiro -no 18	02:30:00	02:40:00	02:25:00	03:05:00	02:40:00	03:05:00	02:40:00	03:00:00	02:50:00	02:20:00	02:43:30	00:15:20	1%
Fão - no 8	02:50:00	03:00:00	02:50:00	03:15:00	03:00:00	03:25:00	02:50:00	03:10:00	03:00:00	02:45:00	03:00:30	00:12:08	1%
Foz do Cávado- no 1	03:10:00	03:15:00	03:10:00	03:30:00	03:15:00	03:45:00	03:15:00	03:30:00	03:15:00	03:00:00	03:18:30	00:12:15	1%

Tabela 20 - Chegada da onda de inundação - cenário 2

Analisando os tempos para a chegada da onda de inundação para o cenário 2 (tabela 21), verifica-se que de entre os autores mais liberais estão Mascarenhas e Hagen, apresentando os tempos mais longos, já Molinário revela-se o mais conservador, com uma propagação da onda mais rápida.

Na análise dos valores intermédios, verificamos que a onda de inundação atinge a Ponte do Porto no concelho de Amares, a 12 km da Barragem da Caniçada em 14min, com um erro +/- 2 min. A onda de inundação chega ao aproveitamento hidroelétrico do Bico (Amares) em 42min, com um erro +/- 4 min. A Vila de Prado (concelho de Vila Verde), a cerca de 22 km da Barragem da Caniçada é atingida pela onda de inundação em 48m com um erro de +/- 5 min. A zona industrial de Padim da Graça (limite dos concelhos Vila Verde / Barcelos / Braga), a cerca de 27 km da barragem da Caniçada começa a ser afetada ao final de 1h 10min, com um erro +/-6 min. O



“coração” da cidade de Barcelos, com a sua ponte medieval, a cerca de 45 km da Caniçada é afetado pela onda de inundação ao final de 2h 1min com um erro +/- 8 min. A onda de inundação atinge o Rio Caveiro (concelho de Esposende) ao final de 2h 43 min com um erro +/- 15 min. A onda de inundação terá o seu destino final na foz do Cávado em Esposende ao fim de 3h 18min, e após ter percorrido cerca de 63 km. De notar que os resultados obtidos, á semelhança do apresentado pelo cenário 1, apresentam erros máximos de 1%.

O cenário 2 em comparação com o cenário 1 apresenta uma menor incerteza, como verificado no capítulo anterior, e como era de esperar, os resultados obtidos apresentam erros menores.

6.3.2 TEMPO PARA A MÁXIMA INUNDAÇÃO – CENÁRIO 2

Na tabela 22 são apresentados os resultados sobre os tempos para atingir a máxima inundação, para o cenário 2.

CENÁRIO 2													
Tempo para a máxima inundação													
	Froehlich	Fread	Freanch	Hagen	Bureau	Mascaranhas	Singh	Saint Venant	ICOLD	Molinário	Média	Desvio padrao	Desvio padrao (%)
Ponte do Porto (Amares) - no 60	01:10:00	01:10:00	01:10:00	01:10:00	01:20:00	01:10:00	01:15:00	01:10:00	01:10:00	01:10:00	01:11:30	00:03:12	0%
Praia Fluvial da Ribeira (Amares)-no 56	01:40:00	01:40:00	01:30:00	01:20:00	01:40:00	01:20:00	01:20:00	01:35:00	01:35:00	01:30:00	01:31:00	00:08:00	1%
Aproveitamento Hidroeletrico do Bico- no 53	02:10:00	02:10:00	02:00:00	01:50:00	02:10:00	01:50:00	01:50:00	02:00:00	02:00:00	01:50:00	01:59:00	00:08:18	1%
Rio Homem	02:10:00	02:10:00	02:00:00	01:50:00	02:10:00	01:50:00	01:50:00	02:10:00	02:00:00	01:50:00	02:00:00	00:08:57	1%
Vila de Prado (Vila Verde)- no 51	02:10:00	02:15:00	02:00:00	02:00:00	02:10:00	02:00:00	02:00:00	02:10:00	02:10:00	01:50:00	02:04:30	00:07:14	1%
Aproveitamento Hidroeletrico do Ruães	02:10:00	02:10:00	02:00:00	02:10:00	02:10:00	02:10:00	02:00:00	02:10:00	02:10:00	01:50:00	02:06:00	00:06:38	0%
Limite concelho Vila Verde / Barcelos - no 46	02:45:00	02:35:00	02:35:00	02:20:00	02:40:00	02:15:00	01:50:00	02:15:00	02:10:00	02:20:00	02:22:30	00:15:42	1%
Aproveitamento Hidroeletrico de Penide- no 42	04:00:00	03:45:00	03:35:00	03:15:00	04:00:00	03:15:00	03:30:00	04:00:00	04:00:00	03:40:00	03:42:00	00:17:12	1%
Fiação de Barcelos - no 37	04:30:00	04:50:00	04:00:00	04:10:00	04:30:00	04:10:00	04:20:00	04:45:00	05:00:00	04:45:00	04:30:00	00:18:50	1%
Ponte Medieval de Barcelos - no 35	05:30:00	05:15:00	05:00:00	04:30:00	05:30:00	04:30:00	05:00:00	05:15:00	05:30:00	05:30:00	05:09:00	00:22:27	2%
E.T.A.R. Barcelos -no 33	05:35:00	05:45:00	05:30:00	04:50:00	05:35:00	04:45:00	05:15:00	05:30:00	05:45:00	05:45:00	05:25:30	00:20:55	1%
Mariz (Quinta de Argemil) - no 28	06:00:00	06:00:00	05:45:00	05:15:00	06:00:00	05:15:00	05:30:00	05:45:00	06:00:00	06:00:00	05:45:00	00:17:45	1%
Rio Caveiro -no 18	06:00:00	06:00:00	06:00:00	05:30:00	06:00:00	05:30:00	05:45:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	05:52:30	00:12:06	1%
Fão - no 8	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	00:00:00	0%
Foz do Cávado- no 1	06:30:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:00:00	06:03:00	00:09:00	1%

Tabela 21 - Tempo para máxima inundação - cenário 2

Analisando os tempos para a máxima inundação, para o cenário 2 (tabela 22) verifica-se que de entre os autores mais liberais estão Froehlich, Bureau, Fread e Icold, apresentando os tempos mais longos, já Hagen e Mascarenhas revelam-se os mais conservadores, com um tempo para a máxima cheia mais rápida.

Na análise dos valores intermédios, verificamos que a máxima inundação atinge a Ponte do Porto no Concelho de Amares em 1h 11min, com um erro de +/- 3 minutos. A máxima inundação chega ao aproveitamento hidroelétrico do Bico (Amares) em 1h 59m com um erro de +/- 8 min. A vila de Prado tem a sua onda de inundação máxima ao final de 2h 4min, com um erro +/- 7 min, assim



como o aproveitamento hidroelétrico de Ruães é fustigado pela máxima inundação aos 2h 6min, com um erro de +/- 6 min. A zona Industrial de Padim da Graça é atingida em 2h 22min +/- 15 min. A ponte medieval de Barcelos tem a onda máxima de inundação após 5h 09min +/-22 min. Neste caso o erro máximo é de 2%.

Comparando os tempos para a máxima inundação entre o cenário 1 e 2 verificamos resultados muito semelhantes, e com pouca variação, podendo dizer que a diferença entre caudais não se traduz em diferenças significativas nos instantes temporais de ocorrência da máxima inundação.

6.3.3 CAUDAL MÁXIMO DA ONDA INUNDAÇÃO – CENÁRIO 2

Na tabela 22 são apresentados os resultados sobre os caudais máximos da onda de inundação, para o cenário 2.

CENÁRIO 2												
Caudal máximo (m3/s)												
	Froehlich	Fread	Freanch	Hagen	Bureau	Mascaranhas	Singh	Saint Venant	ICOLD	Molinário	Média	Desvio padrao
Ponte do Porto (Amares) - no 60	49800	42000	53500	24500	42000	22000	52000	29500	38000	75000	42830	15012
Praia Fluvial da Ribeira (Amares)-no 56	39500	34500	42500	17750	33500	16500	41500	22400	29200	59000	33635	12292
Aproveitamento Hidroelétrico do Bico- no 53	35500	31200	38000	14750	30000	13500	35000	19300	25800	51800	29485	11092
Rio Homem	35500	31200	38000	14750	30000	13500	34800	19300	25800	51800	29465	11082
Vila de Prado (Vila Verde)- no 51	35000	30500	37200	14400	29500	13100	34500	19000	25200	49000	28740	10563
Aproveitamento Hidroelétrico do Ruães	27000	23800	28500	12200	23000	11200	27000	15200	20100	38100	22610	7839
Limite concelho Vila Verde / Barcelos - no 46	13800	12700	14500	7100	12400	6500	13700	9000	10800	18700	11920	3501
Aproveitamento Hidroelétrico de Penide- no 42	12100	11600	12250	5900	11000	5400	11000	8000	9600	14400	10125	2745
Fiação de Barcelos - no 37	11000	10400	11700	5500	11000	5200	9900	7200	8800	13000	9370	2503
Ponte Medieval de Barcelos -no 35	10700	10200	10600	5150	10000	4700	9700	7200	8700	12700	8965	2423
E.T.A.R. Barcelos -no 33	10700	10200	10600	5100	10000	4700	9600	7100	8300	12600	8890	2427
Mariz (Quinta de Argemil) - no 28	10700	10200	10500	5100	9800	4700	9500	7100	8600	12600	8880	2403
Rio Caveiro -no 18	10600	10200	10500	5050	9700	4600	9500	7000	8600	12600	8835	2425
Fão - no 8	10400	9700	10300	4900	9500	4500	9400	6900	8400	12300	8630	2364
Foz do Cávado- no 1	10100	9500	10100	4800	9200	4450	9200	6800	8200	12100	8445	2304

Tabela 22 -Caudal máxima da onda de inundação - cenário 2

À semelhança do cenário 1, as zonas mais próximas da barragem são as que receberão o maior caudal (tabela 22) verifica-se que de entre os autores mais liberais estão Hagen e Mascarenhas, autores estes, que na sua formulação não apresentam o parâmetro “largura da brecha”, apresentando os caudais mais baixos, já Molinario apresenta-se o mais conservador, com o caudal mais elevado.



Analisando os valores de desvio padrão verifica-se que imediatamente a jusante da barragem resultam valores com maior incerteza, que podem ultrapassar os 15 000 m³/s. Já nas regiões junto á foz o erro ronda os 2 000 m³/s.

Em análise aos valores intermédios, a ponte do porto receberá um caudal de 4830 m³/s, assim como a Vila de Prado terá um caudal máximo de 2870 m³/s, a zona da ponte medieval de Barcelos com 8965 m³/s, a foz do Cávado é atingida ainda com 8445 m³/s.

6.3.4 VELOCIDADE MÁXIMA DA ONDA INUNDAÇÃO – CENÁRIO 2

Na tabela 23 são apresentados os resultados sobre as velocidades máximas da onda de inundação, para o cenário 2.

CENÁRIO 2												
Velocidade máxima da Onda de Inundação (m/s)												
	Froehlich	Fread	Freanch	Hagen	Bureau	Mascaranhas	Singh	Saint Venant	ICOLD	Molinário	Média	Desvio padrao
Ponte do Porto (Amares) - no 60	8,30	7,80	8,50	6,80	7,80	5,80	8,60	6,60	7,50	9,60	7,73	1,05
Praia Fluvial da Ribeira (Amares)-no 56	11,20	10,50	11,50	8,00	10,60	7,80	11,50	8,80	10,00	13,20	10,31	1,62
Aproveitamento Hidroeletrico do Bico- no 53	7,30	7,00	7,50	5,50	7,90	5,50	7,20	5,80	6,50	8,20	6,84	0,93
Rio Homem	8,40	8,00	6,00	6,30	7,90	6,10	8,50	6,50	7,20	10,20	7,51	1,27
Vila de Prado (Vila Verde)- no 51	6,10	5,80	6,20	4,80	5,60	4,80	6,20	5,00	5,20	7,20	5,69	0,73
Aproveitamento Hidroeletrico do Ruães	5,20	5,30	5,20	5,80	5,30	4,80	5,20	4,80	5,00	5,20	5,18	0,27
Limite concelho Vila Verde / Barcelos - no 46	4,60	4,50	4,50	4,50	4,60	4,30	4,50	4,50	4,50	4,80	4,53	0,12
Aproveitamento Hidroeletrico de Penide- no 42	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	0,00
Fiação de Barcelos - no 37	3,60	3,60	3,80	3,50	3,60	3,30	3,50	3,50	3,50	3,60	3,55	0,12
Ponte Medieval de Barcelos -no 35	4,30	4,30	4,50	3,60	4,20	3,80	4,20	4,00	4,20	4,60	4,17	0,29
E.T.A.R. Barcelos -no 33	7,50	7,50	7,30	6,60	7,20	6,50	7,50	7,00	7,20	7,60	7,19	0,36
Mariz (Quinta de Argemil)- no 28	2,50	2,50	2,50	3,70	2,50	1,80	7,50	2,20	2,50	3,70	3,14	1,56
Rio Caveiro -no 18	4,50	4,50	4,50	4,80	4,30	3,80	4,50	4,10	4,20	4,80	4,40	0,29
Fão - no 8	2,50	2,50	2,50	2,30	2,60	2,40	2,50	2,50	2,50	2,70	2,50	0,10
Foz do Cávado- no 1	3,80	3,80	3,80	3,60	3,80	2,60	3,60	3,20	3,50	4,20	3,59	0,41

Tabela 23 - velocidade máxima da onda de inundação - Cenário 2

Analisando os resultados obtidos para a velocidade máxima atingida pela onda de inundação, verifica-se que de entre os autores mais liberais estão Hagen e Mascarenhas apresentando os velocidades mais lentas, já Molinario revela-se o mais conservador, com velocidade mais rápida, de salientar de quer Hagen que Mascarenhas não apresentam na sua formulação o parâmetro “largura da brecha”. À semelhança de outros parâmetros analisados, é nas regiões junto da barragem que se verifica a maior incerteza dos resultados obtidos.

Verificando os resultados intermédios obtidos, a onda de inundação chega ao aproveitamento hidroelétrico do Bico com uma velocidade de 6.84 m/s (tabela 23), a interligação Rio Homem –



Rio Cávado é atingida com a velocidade de 7.51 m/s, de salientar que a montante se encontra o aproveitamento hidroelétrico do Bico. Na Vila de Prado a velocidade máxima será de 5.69 m/s +/- 0.73 m/s. A zona industrial de Padim da Graça terá uma velocidade máxima de 4.53 m/s +/- 0.12 m/s. A ponte medieval de Barcelos será fustigada com uma onda de inundação de velocidade máxima de 4.17 m/s +/- 0.29 m/s. A velocidade máxima da onda de inundação na foz do Cávado será de 3.59 m/s +/- 0.41 m/s.

6.3.5 COTA MÁXIMA DA ONDA INUNDAÇÃO – CENÁRIO 2

Na tabela 24 são apresentados os resultados sobre as cotas máximas atingidas pela onda de inundação, para o cenário 2.

CENÁRIO 2												
Cota máxima da Onda de Inundação (m)												
	Froehlich	Fread	Freanch	Hagen	Bureau	Mascaranhas	Singh	Saint Venant	ICOLD	Molinário	Média	Desvio padrao
Ponte do Porto (Amares) - no 60	46,5	45,5	48,0	39,0	45,0	38,3	47,0	41,0	43,5	52,2	44,6	4,1
Praia Fluvial da Ribeira (Amares)-no 56	40,8	39,8	41,5	35,0	39,5	34,6	40,5	36,5	39,3	44,0	39,2	2,8
Aproveitamento Hidroeletrico do Bico- no 53	37,0	37,5	38,5	32,5	37,3	32,0	37,5	34,0	35,5	41,0	36,3	2,6
Rio Homem	38,2	37,5	38,2	31,5	37,0	31,0	36,8	33,0	35,3	41,0	36,0	3,1
Vila de Prado (Vila Verde)- no 51	38,2	37,5	38,2	30,3	37,2	29,4	36,8	33,0	35,2	41,0	35,7	3,5
Aproveitamento Hidroeletrico do Ruães	38,2	37,5	38,2	30,0	37,2	29,4	37,0	33,0	35,2	40,6	35,6	3,5
Limite concelho Vila Verde / Barcelos - no 46	38,2	37,5	38,2	30,0	37,0	29,2	37,0	32,8	35,2	41,0	35,6	3,6
Aproveitamento Hidroeletrico de Penide- no 42	37,6	36,3	37,5	27,3	36,2	26,4	35,8	30,8	33,8	40,6	34,2	4,4
Fiação de Barcelos - no 37	19,6	19,0	19,2	15,8	18,8	14,6	18,6	17,8	17,8	20,6	18,2	1,7
Ponte Medieval de Barcelos- no 35	18,6	18,8	18,2	13,8	18,8	13,4	17,6	15,5	17,8	19,8	17,2	2,1
E.T.A.R. Barcelos -no 33	17,2	16,8	17,0	12,8	17,0	11,4	16,2	14,0	15,5	18,6	15,7	2,1
Mariz (Quinta de Argemil)- no 28	15,0	14,5	14,9	10,5	14,5	10,0	14,1	12,2	13,5	16,3	13,6	1,9
Rio Caveiro -no 18	8,8	8,4	8,6	6,5	8,4	6,4	8,4	7,4	8,8	9,3	8,1	0,9
Fão - no 8	6,6	6,8	6,8	4,8	6,2	4,8	6,2	5,6	6,8	7,0	6,2	0,8
Foz do Cávado- no 1	2,6	2,5	2,5	1,5	2,3	1,4	2,2	1,7	2,0	2,8	2,2	0,5

Tabela 24 - Cota máxima inundação - cenário 2

6.3.6 MAPAS DE INUNDAÇÃO – CENÁRIO 2

Com os resultados observados na tabela 24 é possível a elaboração de mapas de inundação para o cenário 2.

À semelhança do já verificado no cenário 1, ao autores Hagen e Mascarenhas são os mais liberais, relativamente à cota atingida pela onda de inundação, apresentando as cotas mais baixas, traduzindo-se em menor população em risco e menores danos económicos, de salientar que estes autores na sua formulação não apresentam o parâmetro “largura da brecha”. O autor mais

conservador é Molinário, apresentando cotas mais elevadas, no entanto este considera na sua formulação o parâmetro “largura da brecha”

Analisando o desvio padrão dos resultados obtidos, para as cotas atingidas pela onda de inundação, verifica-se uma maior incerteza nos resultados obtidos nas regiões imediatamente a jusante da barragem, traduzindo-se, no entanto, em erros inferiores a 5m.

À semelhança do apurado nos hidrogramas, o cenário 1 revela maior incerteza nos resultados obtidos que o cenário 2, pelo que também neste cenário se considera aceitável a utilização de valores intermédios para a elaboração de mapas de risco.

Relativamente às cotas máximas atingidas pela onda de inundação para o cenário 2 (tabela 25) verifica-se que a Ponte do Porto (Amares) que se encontra à cota 37.2 m será atingida por uma onda de inundação que atinge a cota 44.6m +/- 4.1m (figuras 112 e 113) ficando cerca de 8 m abaixo do apresentado pelo cenário 1 (52.4 m), ou seja, a ponte do porto terá cerca de 7 m de coluna de água acima do seu tabuleiro, em vez dos 15 m verificados no cenário 1.

As diferenças entre o cenário 1 e o agora apresentado pelo cenário 2 é insignificante, quanto a infraestruturas viárias inviabilizados não se verificam alterações em relação ao cenário 1. Relativamente a edifícios públicos a situação é semelhante ao apresentado no cenário anterior, com a ETAR de Prozelo inundada. A nível de edifícios relevantes de carácter privado mantem-se o apresentado no cenário 1, com a exceção da quinta do Burgo que neste cenário não se encontra ameaçada.

A população em risco nesta zona, continua a ser pouco relevante, com uma redução mínima em relação ao cenário 1. A onda de inundação, para esta zona, continua a mostra-se mais prejudicial no concelho de Amares do que no concelho de Braga. Em suma, a população em risco é semelhante, assim como os danos económicos, não se verificando diferenças significativas em relação ao já apresentado no cenário 1.



Figura 112- Perfil de inundação- zona ponte do porto - cenário 2

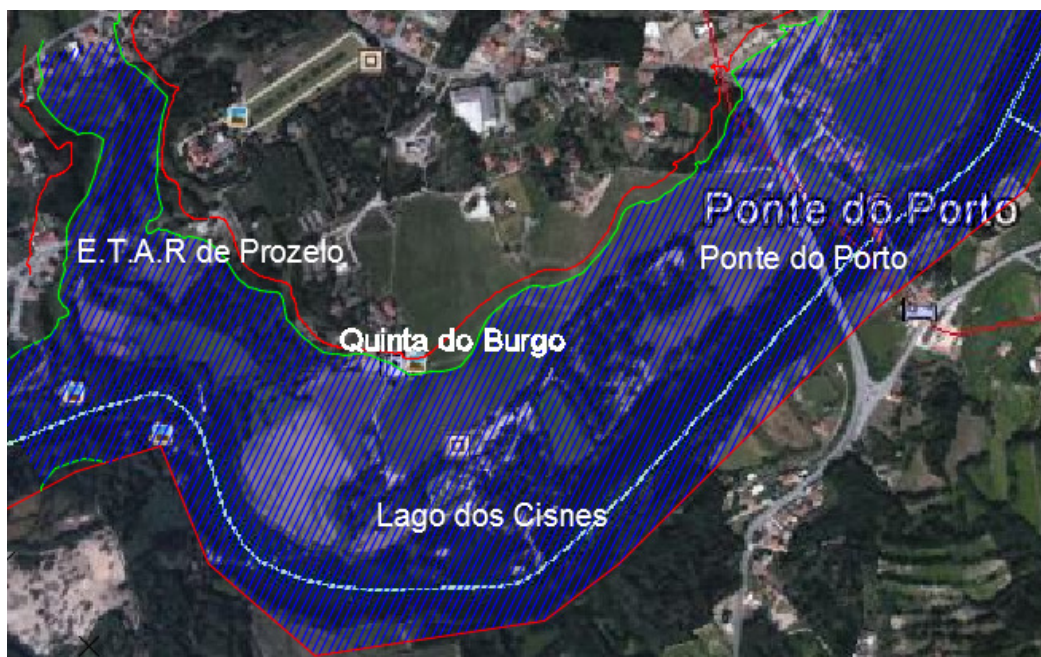


Figura 113 - Onda de inundação - Ponte do Porto - Cenário 2
(cenário 1- a vermelho; cenário 2 – a verde)

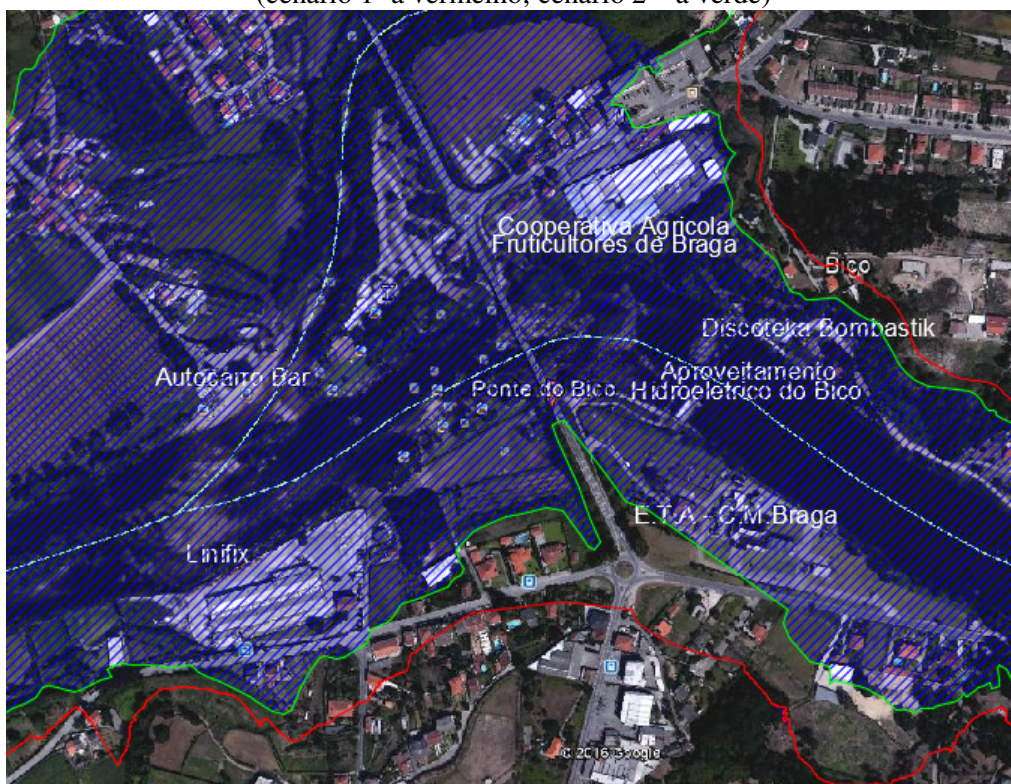


Figura 114 - Onda de inundação - Ponte do Bico - Cenário 2
(cenário 1- a vermelho; cenário 2 – a verde)



Figura 115- Perfil de inundação- zona ponte do Bico- cenário 2

Analisando da confluência Rio Cávado – Rio Homem (figuras 114 e 115) é notória a redução da população em risco assim como dos danos económicos.

Relativamente a infraestruturas viárias o acesso de Braga à ponte do bico, apresenta-se agora parcialmente submerso, assim como a rua da Marginal (concelho de Braga), a EN205 (concelho de Amares) apresenta-se agora também parcialmente inundada. O aproveitamento hidroelétrico do Bico, á semelhança do apresentado no cenário 1, continua inoperacional. Edifícios de carácter público a referir, temos a Estação de Tratamento de Água da Câmara Municipal de Braga inoperacional. No que respeita a edifícios privado com relevância, continua a verificar-se, a perda de alguns edifícios de diversão como discoteca e bar.

A população em risco (PER) é visivelmente menor, sendo a redução mais significativa no concelho de Braga e Vila Verde. Existe ainda uma redução de danos económicos no que respeita a indústrias no concelho de Amares.

Em suma poderá considerar-se uma PER de 200 habitantes, e danos económicos elevados, visto que ainda existe um número significativo de indústrias ameaçadas, edifícios de carater público, e infraestruturas relevantes para a fuga da população.



Figura 116-Onda de inundação - Vila de Prado- Cenário 2
(cenário 1- a vermelho; cenário 2 – a verde)



Figura 117 - Perfil de inundação- Vila de Prado- cenário 2

A Vila de Prado no concelho de Vila Verde, que se situa entre as cotas 21 e 52, será inundada até à cota 35.7 m (figuras 116 e 117). De salientar nesta região é a visível redução da população em

risco, que apesar de menor continua em número preocupante. O concelho de Braga apresenta sobretudo zonas agrícolas onde também é visível a redução da inundação.

Relativamente a infraestruturas inoperacionais verifica-se uma redução, no entanto as artérias principais, e fundamentais em caso de fuga da população continuam inoperacionais como é o caso da EN201 (Braga – Vila de Prado) e da EN 205 parcialmente inundada

Nesta região e para o cenário 2 poderá considerar-se uma PER de cerca de 1200 habitantes, e danos económicos elevados.

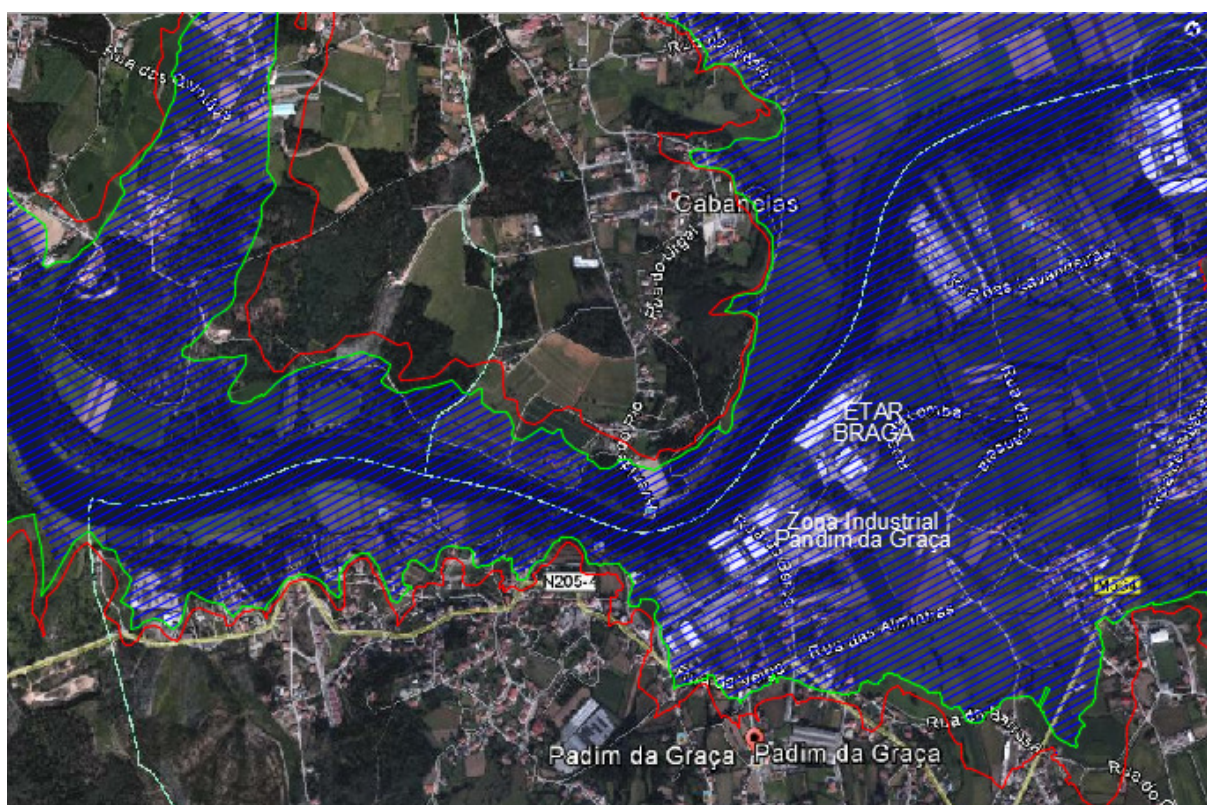


Figura 118- Onda de inundação – Padim da Graça- Cenário 2
(cenário 1- a vermelho; cenário 2 – a verde)



Figura 119 - Perfil de inundação- Vila de Prado- cenário 2

A região da Zona industrial de Padim da Graça (concelho de Braga) que se encontra entre as cotas 23 m e 35 m será inundado na sua totalidade, por uma onda de inundação que atinge a cota 35.6 m (figuras 118 e 119).

Em comparação com o cenário 1, este apresenta uma ligeira redução na mancha de inundação, no entanto quer na PER quer nos danos económicos, essa redução é desprezável mantendo-se uma severidade elevada como apresentado no cenário 1.

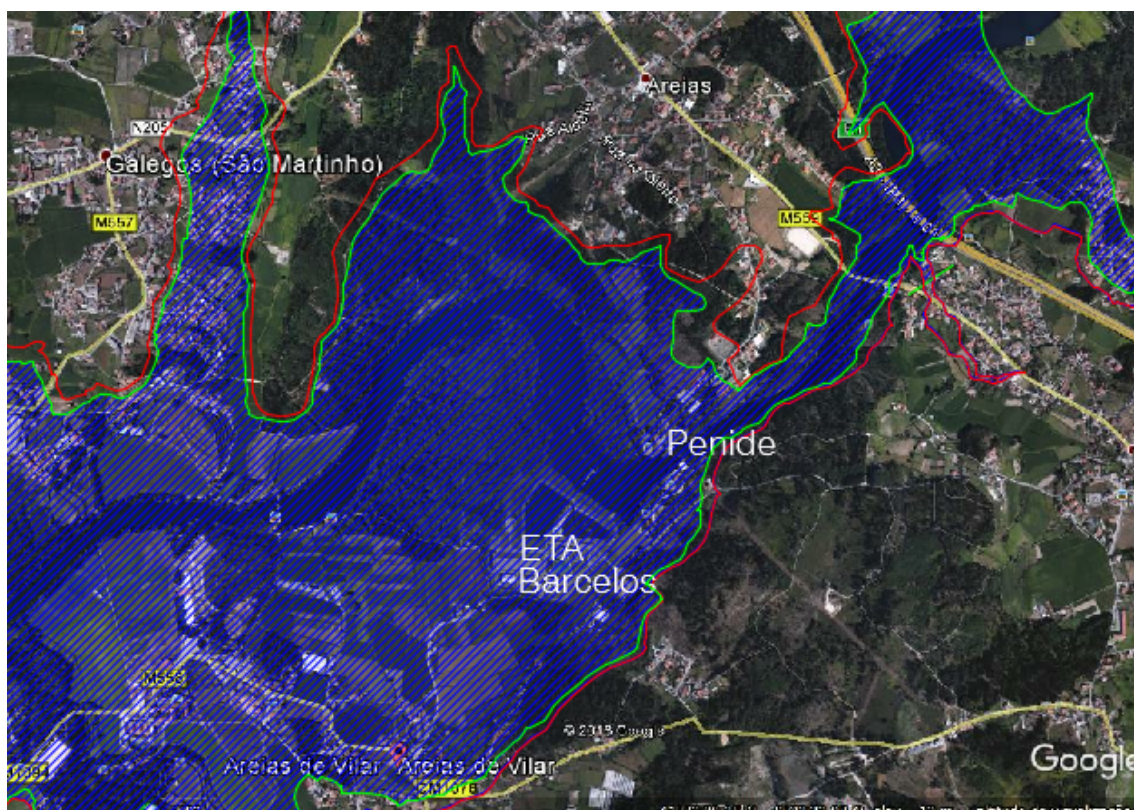


Figura 120 - Onda de Inundação - Penide - Cenário 2
(cenário 1- a vermelho; cenário 2 – a verde)



Figura 121 - Perfil de inundação- Penide- cenário 2

O aproveitamento hidroelétrico de Penide, para o cenário 2, será inundado até à cota 34.2 m (figuras 120 e 121), ficando inoperacional, assim como a estação de tratamento de água de Barcelos (ETA), à semelhança do já verificado no cenário 1. A mancha de inundação, em comparação com o cenário 1, é ligeiramente menor, sendo que é na freguesia de Galegos S. Martinho (concelho de Barcelos) que se continua a verifica a maior PER. Existe de facto uma ligeira diminuição da PER que se considera desprezável, no entanto mantem-se uma severidade alta como verificado no cenário 1.



Figura 122 - Onda de Inundação - Barcelos - Cenário 2
(cenário 1- a vermelho; cenário 2 – a verde)

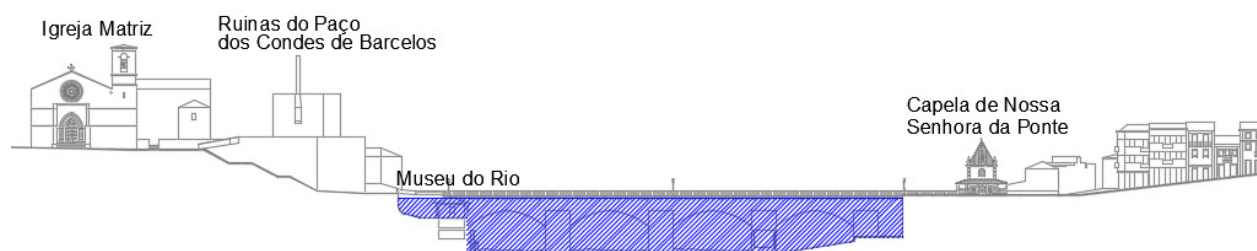


Figura 123 - Perfil de inundação- Cidade de Barcelos - cenário 2

A zona da ponte medieval de Barcelos apresenta uma onda de inundação que atingirá a cota 17,2 m (figuras 122 e 123), onde o tabuleiro da ponte medieval se encontra à cota 18 m, significando que a onda de inundação provocada pelo cenário 2 não atinge o tabuleiro da ponte medieval. Em comparação com o cenário 1, este mostra-se menos destruidor para os equipamentos públicos ameaçados pela onda de inundação, tais como a Escola Secundária de Barcelos, e a Capela da Sr.^a da Ponte que se apresentam parcialmente inundados. O edifício do departamento de Urbanismo da Câmara Municipal e os Bombeiros Voluntários de Barcelinhos, neste cenário 2, não são atingidos pela onda de inundação, ao contrário do que era apresentado no cenário 1. Relativamente a edifícios habitacionais observamos uma diminuição significativa de habitações afetadas pela onda de inundação, quer do lado de Barcelos quer em Barcelinhos. Relativamente a infraestruturas apenas a rua Rosa Ramalho (acesso às Piscinas) se encontra parcialmente inundada. Em suma poderá considerar-se uma PER de 50 habitantes e danos económicos moderados.

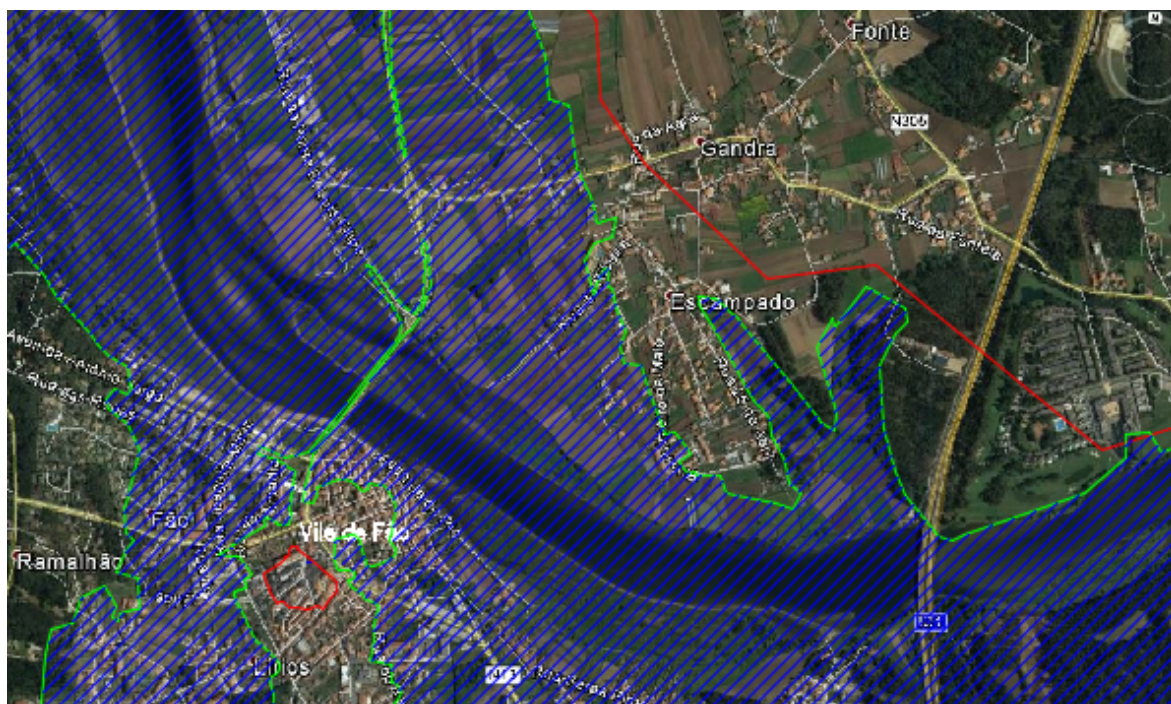


Figura 124 - Onda de Inundação - Fão - Cenário 2
(cenário 1- a vermelho; cenário 2 – a verde)



Figura 125 - Perfil de inundação- Cidade de Barcelos - cenário 2

Para a região de Fão, o cenário 2 apresenta uma onda de inundação que atinge a cota 6,2 m (figuras 124 e 125). Notória é a diminuição da onda de inundação, que desta vez permite que a Vila de Fão se apresente parcialmente inundada e deixando a salvo a zona de Escampado. É de referir que existem infraestruturas viárias que se encontram operacionais, permitindo a fuga da população, no entanto a EN13 encontra-se parcialmente inundada junto à rotunda de Fão.

No cenário 2, na região da Vila de Fão poderá estimar-se uma PER de 1500 habitantes e danos económicos elevados.

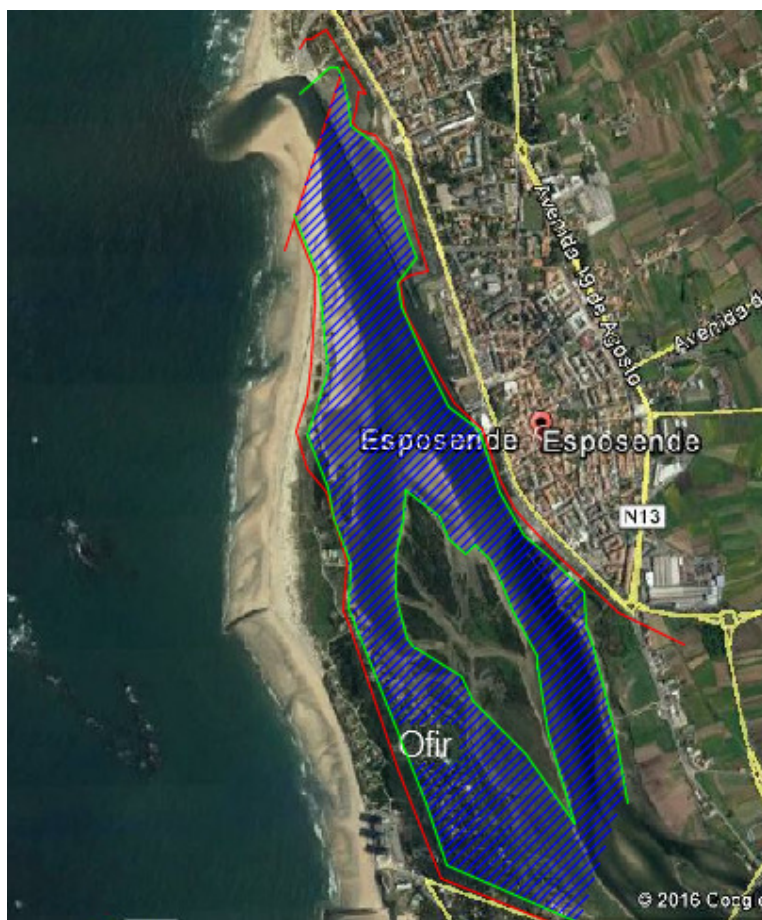


Figura 126 - Onda de Inundação - Esposende - Cenário 2
(cenário 1- a vermelho; cenário 2 – a verde)

Para a zona da cidade de Esposende a onda de inundação não se mostra relevante (figura 126), apresentando um risco insignificante, á semelhança do verificado no cenário 1, sendo que até a ínsua não será afetada. Na Região de Ofir mantém-se a população em risco. Desta forma considera-se um PER de 60 habitantes e danos económicos pouco preocupantes.

6.3.7 RISCO PARA O VALE A JUSANTE DA BARRAGEM DA CANIÇADA – CENÁRIO 2

Com a análise às manchas de inundação, verifica-se que o risco para o vale associado à rutura parcial da barragem com extensão de 62m (cenário 2) apresenta uma menor população em risco (PER), assim como menor danos económicos. Relativamente á probabilidade de ocorrência de acontecimento adverso, considera-se, á semelhança do cenário 1, um acontecimento raro. No que concerne á escala de severidade, verifica-se uma população em risco superior a 5000 habitantes e danos económicos moderados a graves, assim considera-se uma severidade moderada. Utilizando a matriz de classificação e priorização do risco (tabela 6), obtemos um total de 3 pontos com um código de risco laranja significando “risco muito preocupante”, apesar de o risco obter uma pontuação menor mantem-se a priorização de controlo verificada no cenário 1.



6.4 RESULTADOS OBTIDOS – CENÁRIO 3

Na tabela 25 são apresentados os resultados sobre os tempos para a chegada da onda de inundação, a cota atingida pela onda de inundação, os tempos para atingir a máxima cheia e as velocidades máximas da onda de inundação, para o cenário 3.

CENÁRIO 3					
	Chegada da onda de inundação	Cota máxima Cheia (m)	Tempo para a máxima cheia	Caudal Máximo (m ³ /s)	Velocidade máxima da onda (m/s)
Ponte do Porto (Amares) - no 60	01:20:00	28,80	02:30:00	1460	2,20
Praia Fluvial da Ribeira (Amares)-no 56	02:30:00	25,50	03:40:00	1440	2,10
Aproveitamento Hidroelétrico do Bico- no 53	03:00:00	22,80	04:00:00	860	2,60
Rio Homem	03:00:00	22,50	04:00:00	860	2,30
Vila de Prado (Vila Verde)- no 51	03:15:00	21,20	04:15:00	840	2,60
Aproveitamento Hidroelétrico do Ruões	03:30:00	18,50	04:30:00	840	1,70
Limite concelho Vila Verde / Barcelos - no 46	04:10:00	17,20	05:00:00	730	1,70
Aproveitamento Hidroelétrico de Penide- no 42	04:30:00	14,50	05:45:00	650	2,80
Fiação de Barcelos - no 37	05:40:00	7,50	07:00:00	520	1,80
Ponte Medieval de Barcelos -no 35	06:10:00	6,80	07:30:00	510	2,10
E.T.A.R. Barcelos -no 33	06:30:00	2,80	07:40:00	505	3,10
Mariz (Quinta de Argemil)- no 28	07:00:00	2,40	08:30:00	440	0,70
Rio Caveiro -no 18	07:30:00	1,30	09:00:00	410	1,50
Fão - no 8	07:40:00	0,80	09:30:00	390	0,80
Foz do Cávado- no 1	08:00:00	0,20	10:00:00	370	0,60

Tabela 25 - Resultados obtidos cenário 3

Comparando o cenário 3 (tabela 25) com os cenários já apresentados verifica-se que a propagação da onda de inundação é bastante mais lenta, chegando mesmo a haver um intervalo de valores entre os cenários 1 e 2 e o cenário 3 de cerca de 1 hora. Dado que se trata de um caudal muito inferior aos apresentados nos cenários anteriores, era de esperar que a cota da máxima cheia fosse também bastante inferior.

6.4.1 MAPAS DE INUNDAÇÃO – CENÁRIO 3

Com os resultados observados na tabela 25 é possível a elaboração dos seguintes mapas de inundação, para o cenário 3.



Figura 127 - Onda de inundação - Ponte do Porto - Cenário 3
(cenário 1 a vermelho, cenário 2 a verde, cenário 3 a azul)



Figura 128- Perfil de inundação- zona ponte do porto - cenário 3

Para a região de Ponte do Porto, o cenário 3 mostra-se pouco gravoso (figuras 127 e 128), sendo que nenhuma infraestrutura viária fica comprometida, assim como nenhum equipamento público. Não existem habitações ameaçadas pela onda de inundação, apenas a quinta Lago dos Cisnes se apresenta parcialmente inundada, no entanto nenhum edifício do complexo se apresenta inundado, apresentando-se as pequenas ínsuas submersas.

No concelho de Amares (a norte) é notória a diferença entre os cenários de rutura de barragem e o cenário onde a Caniçada funciona em condições extremas (azul). No concelho de Braga (a sul) a onda de inundação galga ligeiramente as margens do rio Cávado.

Considera-se nesta situação uma PER negligenciável e danos económicos insignificantes.

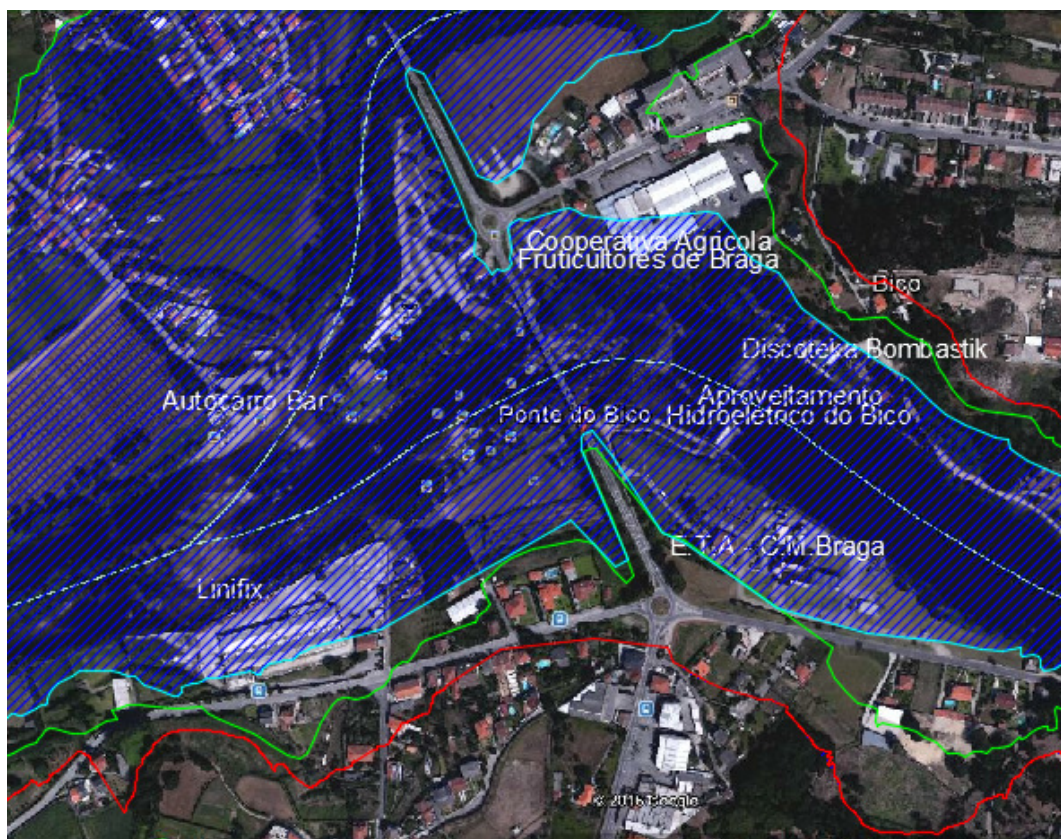


Figura 129 - Onda de Inundação - Ponte do Bico - Cenário 3
(cenário 1 a vermelho, cenário 2 a verde, cenário 3 a azul)

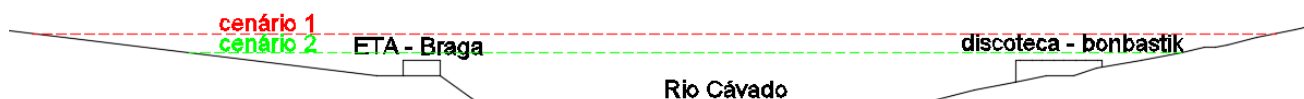


Figura 130 - Perfil de inundação- zona ponte do porto - cenário 3

Relativamente à região do aproveitamento hidroelétrico do Bico, há a salientar a redução significativa da mancha de inundação observada no cenário 3 e os cenários de rutura de barragem (figuras 129 e 130).

No concelho de Braga (a sul), de salientar que não há habitações ameaçadas pela onda de inundação, e nenhuma infraestrutura viária fica comprometida. Relativamente a equipamentos há a salientar a continuação da inoperacionalidade da ETA de Braga. No concelho de Amares a mancha de indústrias é significativamente menor, no entanto continua a verificar-se a inundação parcial de algumas. No concelho de Vila Verde a diferença entre os 3 cenários é pouco significativa, continuando a verificar-se um grande número de habitações submersas.

Relativamente a infraestruturas há a salientar a operacionalidade da Ponte do Bico, permitindo a livre circulação entre Braga e Amares, bastante significativo para a fuga da população.

Considera-se nesta situação uma PER de 150 habitantes e danos económicos moderados.



Figura 131 - Onda de Inundação - Vila de Prado - Cenário 3
(cenário 1 a vermelho, cenário 2 a verde, cenário 3 a azul)

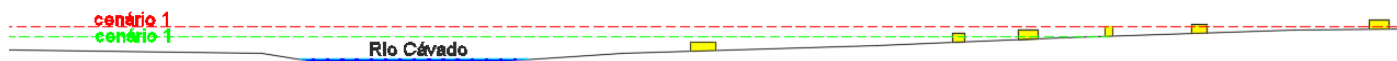


Figura 132 - Perfil de inundação- Vila de Prado - cenário 3

Analisando a região da Vila de Prado é notória a diferença entre os cenários com rutura da Barragem e o cenário de funcionamento da Barragem da Caniçada em condições extremas (figura 131 e 132), sendo significativamente menor. No cenário agora apresentado, a onda de inundação galga ligeiramente as margens do rio Cávado, sendo que não existe qualquer ameaça quer para habitações, quer para infraestruturas viárias.

Considera-se uma PER inexistente e danos económicos negligenciáveis.

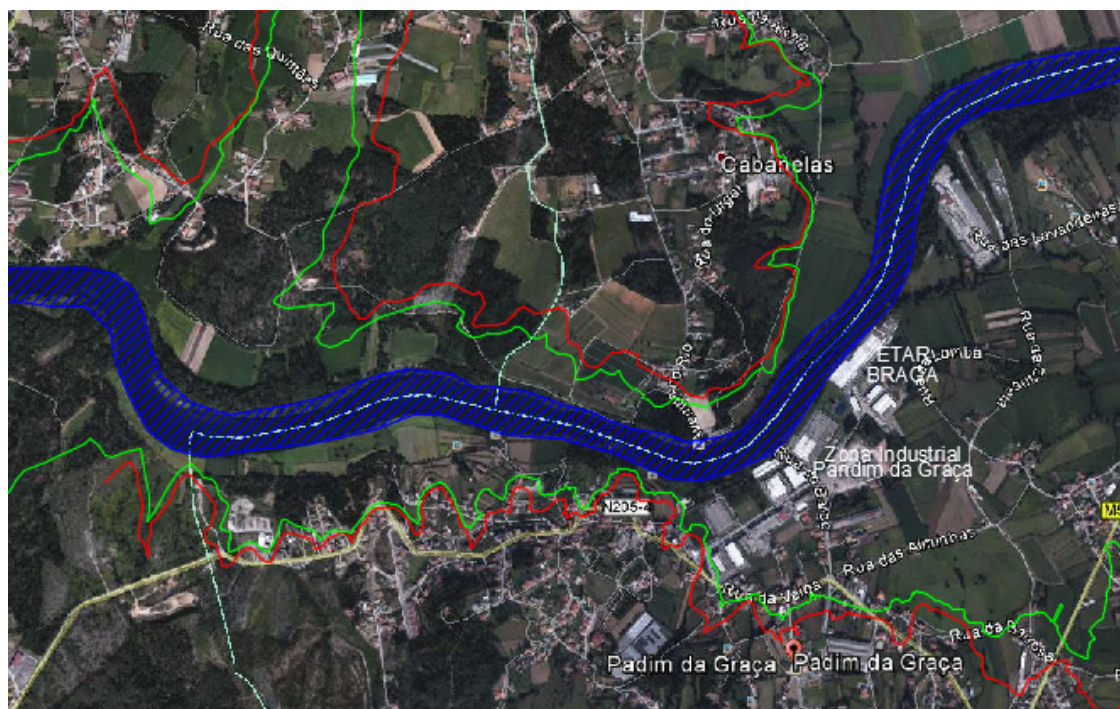


Figura 133 - Onda de Inundação - Padim da Graça - Cenário 3
(cenário 1 a vermelho, cenário 2 a verde, cenário 3 a azul)

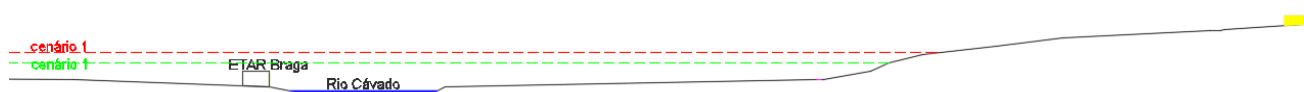


Figura 134 - Perfil de inundação- Vila de Prado - cenário 3

Na região da Zona Industrial de Padim da Graça, mais uma vez se verifica uma enorme redução da mancha de inundação entre os cenários rutura de barragem e o agora cenário 3 (figura 133 e 134). No cenário 3 a zona industrial de Padim de Graça não sofre qualquer ameaça, sendo que a onda de inundação galga ligeiramente as margens do rio. De notar que nenhuma habitação se encontra ameaçada, assim como as indústrias, e infraestruturas, nem mesmo a ETAR de Braga, localizada nas margens do rio.

Novamente considera-se uma PER inexistente e danos económicos negligenciáveis.

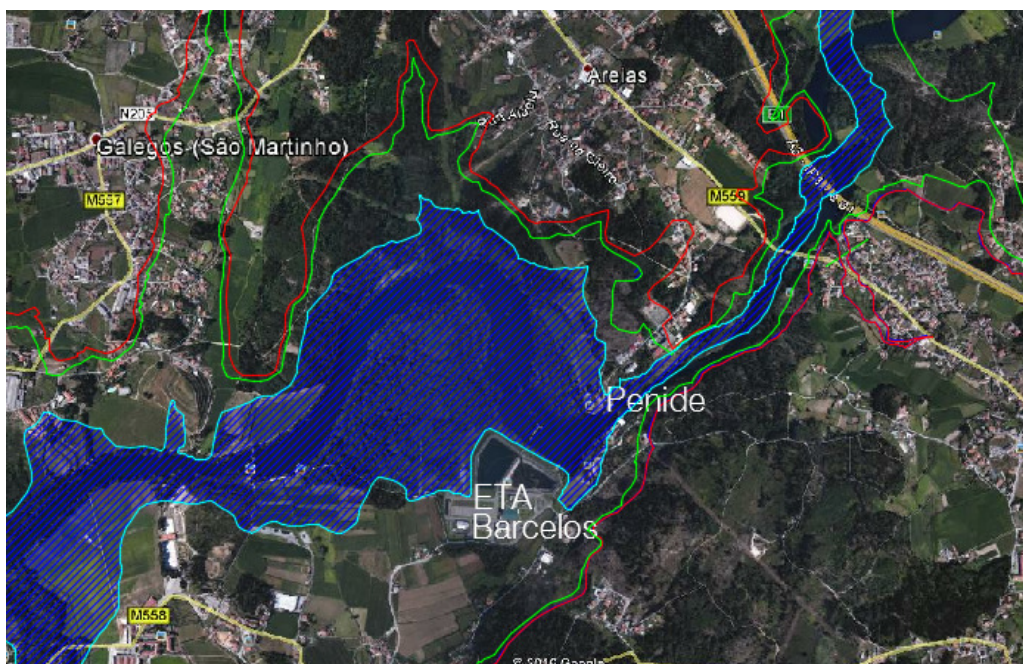


Figura 135 - Onda de Inundação - Penide - Cenário 3
(cenário 1 a vermelho, cenário 2 a verde, cenário 3 a azul)



Figura 136 - Perfil de inundação- Vila de Prado - cenário 3

Na Região de Penide a onda de inundação galga as margens do rio com alguma relevância após a barragem de Penide (figuras 135 e 136), alagando essencialmente terrenos florestais. De salientar que não existem habitações ameaçadas, e a ETA de Barcelos não sofre inundação.

Para esta região considera-se uma PER inexistente e danos económicos pouco relevantes.

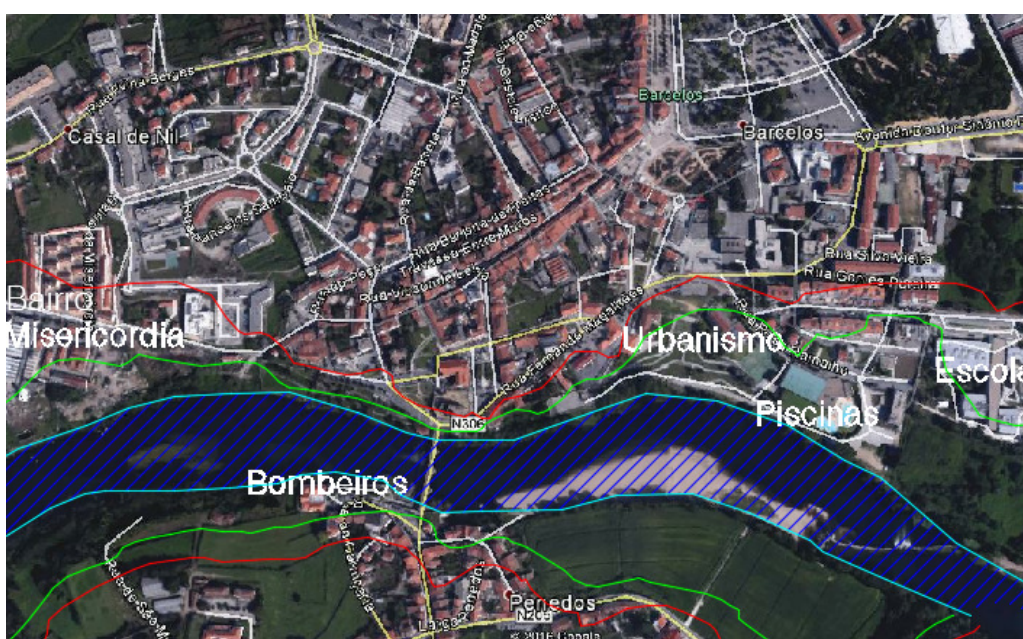


Figura 137 - Onda de Inundação - Cidade de Barcelos - Cenário 3
(cenário 1 a vermelho, cenário 2 a verde, cenário 3 a azul)

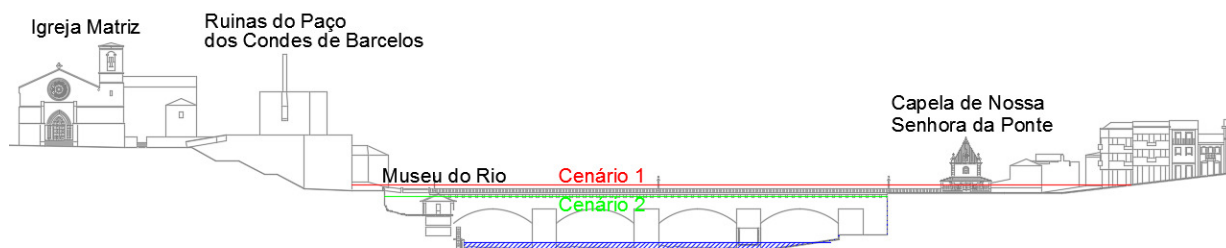


Figura 138 - Perfil de inundação- Cidade de Barcelos - cenário 3

Na cidade de Barcelos a onda de inundação provocada pelo cenário 3, não apresenta qualquer ameaça para a cidade (figuras 137 e 138), sendo que não existem habitações ameaçadas, nem equipamentos públicos, e numa infraestrutura viária será afetada.

A onda de inundação provocada pelo cenário 3, atinge a cota 6,8 nesta região, colocando a praia fluvial de Barcelinhos submersa, mas não chega a galgar as margens do rio.

Mais uma vez obtemos uma PER inexistente e danos económicos negligenciáveis.



Figura 139 - Onda de inundação - Vila de Fão - Cenário 3
(cenário 1 a vermelho, cenário 2 a verde, cenário 3 a azul)

O cenário 3 não mostra qualquer tipo de ameaça para a Vila de Fão (figura 139), sendo que apenas em algumas zonas chega a galgar a margem do rio, mesmo neste caso, sem relevância. Nenhuma habitação se encontra ameaçada, assim como nenhuma infraestrutura viária. Também para esta região é notória a diferença entre os cenários de rutura de barragem e o cenário de barragem com funcionamento em condições extremas.

Considera-se uma PER inexistente e danos económicos negligenciáveis.

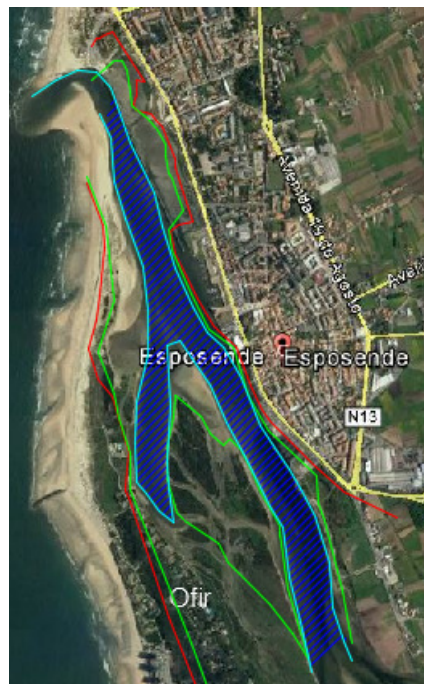


Figura 140 - Onda de Inundação - Cidade de Esposende - Cenário 3
(cenário 1 a vermelho, cenário 2 a verde, cenário 3 a azul)

Quanto á cidade de Esposende a onda de inundação provocada pelo cenário 3 (a azul), não apresenta qualquer ameaça para a cidade (figura 140), à semelhança do já verificado pelos cenários de rutura de barragem. Também no cenário 3 não haverá inundação da “ínsua”, sendo que não se verifica qualquer ameaça para a região de Ofir.

Também nesta região se poderá considera-se uma PER inexistente e danos económicos negligenciáveis.

6.4.2 RISCO PARA O VALE A JUSANTE DA BARRAGEM DA CANIÇADA – CENÁRIO 3

Analisando as manchas de inundação, provocadas pelo cenário 3 verifica-se que o risco para o vale é significativamente menor que o apresentado pelos cenários de rutura de barragem, apresentando uma (PER) praticamente inexistente, assim como danos económicos praticamente negligenciáveis á exceção da inoperacionalidade da ETA de Braga. Relativamente á probabilidade de ocorrência de acontecimento adverso, considera-se a barragem em funcionamento extremo. No que concerne á escala de severidade, verifica-se que a população em risco será inferior a 1000 habitantes e danos económicos praticamente negligenciáveis, desta forma considera-se uma severidade pequena. Utilizando a matriz de classificação e priorização do risco (tabela 6), obtemos um total de 2 pontos com um código de risco amarelo significando “risco preocupante”, o cenário 3 obtém uma priorização de controlo inferior, aos cenários de rutura de barragem, ou seja, os cenários de rutura devem ter uma priorização mais relevante.



CAPITULO 7 – CONCLUSÃO

Em conclusão, poderá dizer-se que a rutura da Barragem da Caniçada nas condições definidas no cenário 1, ou uma rutura parcial da mesma nas condições definidas no cenário 2, não apresentam grandes diferenças em termos de áreas de inundação, sendo que estes dois cenários em comparação com um funcionamento em condições extremas da Barragem se apresentam catastróficos, e isso pode inferir-se pelas diferentes áreas de inundação estimadas a partir dos resultados obtidos com o modelo hidrodinâmico.

Os concelhos mais fustigados por uma possível cheia, provocada pela rutura da Barragem da Caniçada serão Amares, Vila Verde, Barcelos e Esposende. O concelho de Amares apresenta um numero significativo de edifícios turístico afetados, assim como algumas infraestruturas viárias como é o caso da ponte o Porto. No concelho de Vila Verde o ponto mais crítico surge na Vila de Prado, onde se concentra um grande número de população em risco, assim como infraestruturas viárias com a ponte de ligação Braga / Vila de Prado a ser afetada. Já o concelho de Barcelos apresenta o seu ponto mais crítico na própria cidade, sendo o concelho com maior número de equipamento públicos ameaçados como é o caso da Escola Secundária de Barcelos, o edifício do departamento de Urbanismo, ou mesmo o quartel de Bombeiros de Barcelinhos, de salientar ainda a perda da emblemática ponte medieval. No concelho de Braga há a salientar a inundação da zona industrial de Padim da Graça e da sua ETAR na mesma região, e da sua ETA junto ao aproveitamento hidroelétrico do Bico. A onda de inundação no concelho de Esposende apresenta-se problemática apenas para a Vila de Fão com a inundação da total da Vila.

Uma das maiores perdas de vidas humanas observa-se na Vila de Prado (concelho Vila Verde), com uma população onde a dependência de idosos e a dependência de jovens é bastante elevada, e uma taxa de analfabetismo de 7.32%, sendo mesmo de entre as populações em risco a mais idosa e com menos escolaridade, características que podem influenciar a perceção do risco e a fuga. A maior perda de vidas humanas poderá verificar-se na Vila de Fão (concelho Esposende) com uma população mais jovem, com menor dependência de idosos e menor dependência de jovens, e uma taxa de analfabetismo de 4.38%, não sendo das populações em risco, a mais jovem é no entanto a que apresenta a taxa de analfabetismo mais baixa, podendo tornar-se uma característica relevante em caso de escolha de opção de fuga. Padim da Graça (concelho Braga) apresenta-se com a maior perda de indústrias, já a maior perda de equipamentos públicos acontece em Barcelos, de notar que estas são também as regiões com maior capacidade de fuga, pois são as que mais infraestruturas viárias apresentam, de salientar que são as únicas regiões com infraestruturas ferroviárias e autoestradas, sendo que nenhuma destas infraestruturas se encontra ameaçada.



Relativamente á severidade das consequências é notória a diferença entre os cenários de rutura de barragem e o cenário de funcionamento da barragem em condições extremas, sendo que uma rutura total de barragem significa uma severidade Alta, colocando um número muito elevado de pessoas em risco, e acarreta danos económicos graves, traduzindo-se num risco muito preocupante. Já o funcionamento da Barragem em condições extremas mostra-se com uma severidade pequena, colocando um número baixo de pessoas em risco e apresentando pequenos danos económicos, traduzindo-se num risco preocupante.

Salienta-se que o modelo utilizado apresenta algumas simplificações, tal como a discretização espacial do canal fluvial, pelo que os resultados obtidos deverão ser encarados com prudência, sobretudo na proximidade de construções cuja geometria implique a ocorrência de escoamentos complexos. Ressalva-se ainda que se considerou as comportas da Barragem de Penide abertas, assim como no aproveitamento hidroelétrico de Ruães e do Bico, no entanto poder-se-ia considerar que as mesmas se encontravam fechadas, pelo que os resultados obtidos, para estes locais seriam diferentes.

Um dos maiores contributos desta dissertação serão os resultados obtidos através do modelo hidrodinâmico para uma região onde estudos semelhantes são relativamente escassos, obtendo-se desta forma mais um meio de informação quer para a sociedade, quer para a ajuda na tomada de decisões por parte dos órgãos institucionais. Outro dos contributos consistiu na introdução de secções transversais mais abrangentes que aquelas que constavam da versão original do modelo hidrodinâmico utilizado. A informação planimétrica foi obtida através de cartografia vetorizada atualizada fornecida pelos municípios abrangidos pelo estudo. Infelizmente não foi possível obter cartografia vetorizada atualizada de todos os municípios, sendo necessário recorrer a software específico para a obtenção da mesma através na informação disponibilizada no Google Earth.

Para a realização desta dissertação foi necessário a utilização de vários programas como o Sobek (modelo simulação), CIVIL 3D (tratamento de plantas vetorizadas), Global Mapper (cartografia vetorizada em falta dos restantes municípios), Google Earth.

7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Salienta-se que o trabalho aqui apresentado foi no âmbito de dissertação de mestrado, tratando-se de um trabalho isento e imparcial. Ressalva-se ainda que o modelo utilizado é uma aproximação da realidade, apresentando algumas simplificações. Salvaguarda-se que o presente trabalho se refere a cenários prospetivos, e que os resultados obtidos dependem das considerações de fronteira estabelecidas pela autora, pelo que os resultados obtidos devem ser encarados com prudência.



7.2 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros propõe-se a realização de simulações de propagação de cheias provocadas por rutura de barragem com outro software como por exemplo HEC-RAS, e efetuar uma comparação de resultados entre os dois programas.

Efetuar um estudo semelhante envolvendo toda a bacia hidrográfica do Cávado. Dado que para este estudo se simulou apenas uma rutura na barragem da Caniçada. Propõe-se que se avalie uma rutura na Barragem do Alto Rabagão.

Uma outra proposta seria uma simulação para uma cheia induzida provocada por uma rutura em cadeia de várias barragens.



8 REFERÊNCIAS

- Aleixo, Rui (January 2013); Experimental Study of the Early Stages of A Dam-Break Flow Over Fixed and Mobile Beads – thesis presented for the degree of doctor in Engineering Sciences; Université Catholique de Louvain
- A. Malhadas, Madalena; Leitão, P.C ; Ribeiro, J.; Silva .A , Leitão .P ,(Junho2012); Sistema integrado de simulação de cheias no Estuário do Espírito Santo (Baía de Maputo, Moçambique); 2ª Jornadas de Engenharia Hidrográfica – Instituto Superior Técnico de Lisboa
- Almeida, Elisa; Alexandrino, Álvaro, Fernandes, David; (outubro 2009); observações geodésicas em barragens; 2º Encontro Nacional de Geodesia Aplicada (LNEC); EDP Produção
- Anita, Rajesh Singh ;Sushabhan Choudhury; Bhupendra Singh;(2015); Wireless Disaster Monitoring and Management System for Dams; Procedia Computer Science 48 (2015) 381 – 386; International Conference on Intelligent Computing, Communication & Convergence; Sciencedirect; Acedido em : 28-06-2015
- Betâmio de Almeida, António (setembro 2011) Gestão da Água: Incertezas e Riscos – Conceptualização Operacional; Esfera dos Caos
- Betâmio de Almeida, António; Risco Associado à Segurança de Barragens; Instituto Superior Técnico de Lisboa.
- Betâmio de Almeida, António;(março 2004); O conceito de risco socialmente aceitável como componente crítico de uma gestão do risco aplicada aos recursos hídricos; 7º congresso da Água; APRH
- Brasil, Lucas; (novembro 2005), Utilização de modelagens uni e bidimensional para a propagação de onda de cheia proveniente de ruptura hipotética de barragem. Estudo de caso: barragem de rio de pedras – mg; Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais,
- Brito dos Santos; Franca, M.; Betâmio de Almeida, António; (Dezembro 2007) Risco Associado á rutura por galgamento de Barragens de Aterro; Ingenieria del água, Vol 14, nº4; Fundacion para el fomento de la Ingenieria del água. Acedido em – 18-06-2015
- Brito, António; Pinho, José; Costa, Sérgio (2008); Estudo de valorização e desenvolvimento estratégico dos rios Cávado e Homem; Universidade do Minho, Simbiente – Engenharia e Gestão Ambiental
- Camelo, Armando (2011); Durabilidade e vida útil das estruturas hidráulicas de betão e de betão armado; EDP Produção
- Companhia Portuguesa de Produção de Electricidade(1997); Caniçada - Vilarinho das Furnas – Salamonde, Companhia Portuguesa de Produção de Electricidade, Lisboa
- Bocchiola, Daniele; Rosso, Renzo ; (maio 2014); Safety of Italian dams in the face of flood hazard; Advances in Water Resources 71 (2014) 23–31; Acedido em 01-07-2015



Decreto-Lei n.º 344/2007 (Regulamento de Segurança em Barragens)

Froehlich, David C., (August 1987), Embankment-Dam Breach Parameters, Hydraulic Engineering, Proceedings of the 1987 ASCE National Conference on Hydraulic Engineering, Williamsburg,

Hagen, Vernon K., (1982), Re-evaluation of Design Floods and Dam Safety, 14th Congress of International Commission on Large Dams.

Hamilton, Douglas; Meehan, Richard; Ground Rupture in the Baldwing Hills (Abril 1971), Science volume 172, p.333 – 334 – Acedido em 18-06-2015

Hatice Ozmen-Cagatay , Selahattin Kocaman , Hasan Guzel;(January 2014) Investigation of dam-break flood waves in a dry channel with a hump; Journal of Hydro-environment Research 8 (2014) 304e315; ScienceDirec – Acedido em 28-06-2015

Heather M. Bell, Graham A. Tobin; Environmental Hazards 7 (2007) 302–311; ScienceDirec, Acedido em: 28-06-2015

Lança, Rui; Análise do risco associado à rotura da barragem de Fernandilho. Modelação hidrodinâmica da onda de cheia; Instituto Superior Técnico de Lisboa.

Macedo, João;(Julho 2012); Avaliação do funcionamento e dimensionamento hidráulico de chaminés de equilíbrio em aproveitamentos hidroelétricos; Dissertação de mestrado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Marques, João; Plano de Emergência interno de Barragens (Dezembro 2014); Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil; Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Em: <http://hdl.handle.net/10362/14175> - Acedido em 20-06-2015

Mendonça, Mateus; (novembro 2013) Estudo hidráulico em modelo reduzido de descarregadores de cheias: utilização de conchas de rolo na dissipação de energia do escoamento; Dissertação de mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa – Faculdade de Engenharia.

MGS Engineering Consultants, (October 2007) Inc. for Water Resources Program Dam Safety Office, Dam break inundation analysis and downstream hazard classification

Moreira, Enquadramento do Sistema de Excitação do Alternador no Aproveitamento Hidroelétrico de Caniçada, Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Universidade do Minho

Najm O.S. Alghazali, Dilshad A.H. Alhadrawi; The Mathematical Model of RCC Dam Break, Bastora Dam as a Case Study; Journal of kerbala university , vol. 10 no.3 scientific . 2012

Pinho, J. L. S. (2013). Tutorial Criação de modelos com o programa SOBEK Utilizando recursos www: Google Earth e kml2shp online. Universidade do Minho - Escola de Engenharia Departamento de Engenharia Civil.

Pinto, A. Veiga, (novembro 2008); Gestão de Riscos e Segurança de Barragens; Lnec; Acedido em: 19-06-2015



Quintela, A.C (1990); Estruturas Hidráulicas;

S. N. JONKMAN; Global Perspectives on Loss of Human Life Caused by Floods; Natural Hazards (2005) 34: 151–175; Springer; Acedido em 28-06-2015

Sá, Luís; (2008)Regulamento de Segurança de Barragens e a Proteção Civil; Autoridade nacional de Proteção Civil – Acedido em 18-06-2015

Sampaio Duarte, António; Pinho, José Luís; Ramisio, Paulo Jorge, Vieira, José Pereira; Modelação matemática do impacto de caudais de cheia nas condições de escoamento fluvial. um caso de estudo. Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.Em: https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/7870/1/ASDuarte_5%C2%BAsilusba_2001.pdf – Acedido em 25-06-2015

Singh, V.P., and C.A. Quiroga, (1988), Dimensionless Analytical Solutions for Dam-Breach Erosion, Journal of Hydraulic Research, vol. 26, no. 2, p. 179-197.

U.S. Bureau of Reclamation, (June 1982), Guidelines for Defining Inundated Areas Downstream from Bureau of Reclamation Dams, Reclamation Planning Instruction

Veiga Pinto, (julho 2009); Lições sobre a Rutura da Barragem de Algodões; in jornal Construir

Viseu, Teresa; (janeiro 2006); Segurança dos Vales a jusante de Barragens. Metodologias para apoio á gestão de Risco. Tese de doutoramento em Engenharia Civil. IST, Lisboa

Viseu, Teresa; Betâmio de Almeida, António (maio 2010); Gestão do Risco nos Vales a Jusante das Barragens: da probabilidade de ocorrência de cheia induzida á vulnerabilidade do vale a jusante; LNEC

White, Frank (2011); Fluid Mechanics, 6th edition; McGraw-Hill Companies

Wahl, Tony L. (1998), Prediction of embankment dam breach parameters, Bureau of Reclamation

Wahl, Tony L., (July 1998) Water Resources Research Laboratory, U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Dam Safety Office, Prediction of Embankment Dam Breach Parameters.

http://cnpgeb.apambiente.pt/gr_barragens/gbportugal/ Acedido 18-06-2015

snirh.apambiente.pt/ Acedido 18-06-2015

<http://www.prociv.pt/RiscosVulnerabilidades/RiscosNaturais/SegurancaBarragens/> Acedido 18-06-2015

<http://www.prociv.pt/SiteCollectionImages/barragens.jpg> Carta de perigosidade de rutura de barragens – Acedido em 18-06-2015

<http://www.prociv.pt/SiteCollectionImages/hidrologico.jpg> Carta de risco hidrológico – Acedido em 18-06-2015



http://www-ext.lnec.pt/LNEC/museuvirtual/observacao_barragbetao1.html - Acedido em 05-08-2015

<http://eduvisilva.com.sapo.pt/minihidrica.htm#car> – Acedido em 11-11-2015

<http://www.global-hydro.eu/> - – Acedido em 11-11-2015